Conditions d’utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- Le Conservatoire numérique communément appelé le Cnum constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d’œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s’inscrit dans le cadre de la loi nº 78-753 du 17 juillet 1978 :

- **la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue (Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - http://cnum.cnam.fr)**
- **la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l’objet d’une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.**

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- **les reproductions de documents protégés par le droit d’auteur, uniquement consultables dans l’enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l’autorisation préalable du titulaire des droits.**

4- Pour obtenir la reproduction numérique d’un document du Cnum en haute définition, contacter cnum(at)cnam.fr

5- L’utilisateur s’engage à respecter les présentes conditions d’utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d’une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d’utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

Auteur(s)	**Wünschendorff, Jules-Hippolyte-Eugène (1840-1901)**
Titre	**Traité de télégraphie sous-marine : historique, composition et fabrication des cables télégraphiques, immersion et réparation des cables sous-marins, essais électriques, recherche des défauts, transmission des signaux, exploitation des lignes sous-marines**
Adresse	**Paris : Librairie polytechnique, Baudry et Cie, éditeurs, 1888**
Collation	**1 vol. (X-555-[1] p.-[1] f. de pl.) : ill. ; 28 cm**
Nombre d'images	**572**
Cote	**CNAM-BIB 4 Ca 66**
Sujet(s)	**Câbles sous-marins** **Télégraphe**
Thématique(s)	**Technologies de l'information et de la communication**
Typologie	**Ouvrage**
Langue	**Français**
Date de mise en ligne	**21/01/2021**
Date de génération du PDF	**20/01/2021**
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?4CA66

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TRAITÉ

DE

TÉLÉGRAPHIE SOUS-MARINE

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

EVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

4° Ca 66

TRAITÉ

DE

TÉLÉGRAPHIE

SOUS-MARINE

HISTORIQUE
COMPOSITION ET FABRICATION DES CABLES TÉLÉGRAPHIQUES
IMMERSION ET RÉPARATION DES CABLES SOUS-MARINS
ESSAIS ÉLECTRIQUES. — RECHERCHE DES DÉFAUTS
TRANSMISSION DES SIGNAUX. — EXPLOITATION DES LIGNES SOUS-MARINES

PAR

E. WÜNSCHENDORFF
INGÉNIEUR DES TÉLÉGRAPHES
DIRECTEUR DE TÉLÉGRAPHIE MILITAIRE

469 gravures dans le texte.

PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET Cie, ÉDITEURS
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
MAISON A LIÈGE, RUE LAMBERT-LEBÈGUE, 19
1888
Tous droits réservés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières I
Avant-propos VII
Introduction IX

PREMIÈRE PARTIE

HISTORIQUE

Origines de la télégraphie sous-marine 1
Câble d'expérience de Douvres à Calais 5
Deuxième câble de Douvres à Calais 7
Câbles de Holyhead à Howth, de Portpatrick à Donaghadee, de Douvres à Ostende, etc. 9
Câbles de la Spezzia à la Corse et de la Sardaigne à Bône 9
Câble de la mer Noire 14
Câbles de Cagliari à Malte et de Malte à Corfou 15
Premier câble atlantique 15
Câbles de la mer Rouge et des Indes 24
Commission chargée d'étudier les conditions de fabrication, d'immersion et de réparation des câbles sous-marins 25
Commission chargée de déterminer un système rationnel d'unités électriques 26
Câble de Malte à Alexandrie 27
Câbles de Toulon à Alger et d'Alger à Port-Vendres 28
Câble d'Oran à Carthagène 30
Câble du golfe Persique 35
Câbles atlantiques de 1865 et 1866 37
Carte des communications télégraphiques sous-marines du globe 54

DEUXIÈME PARTIE

COMPOSITION ET FABRICATION DES CABLES SOUS-MARINS

CHAPITRE PREMIER

CONDUCTEUR

Cuivre : propriétés physiques. — Forme du conducteur. — Fabrication 55

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE II

ENVELOPPE ISOLANTE

§ 1er. Gutta-percha. — Production. — Propriétés physiques et chimiques. — Fabrication : épuration, machines à recouvrir de gutta-percha, composition Chatterton. — Gutta-percha perfectionnée de W. Smith. 66
§ 2. Caoutchouc. — Propriétés physiques et chimiques. — Vulcanisation. — Epuration et modes d'application sur les conducteurs. — Caoutchouc Hooper. — Altérations. 96
§ 3. Autres isolants. — Composition Wray, paraffine, ozokérite, nigrite, kérite, caoutchouc de M. Bruce Warren. — Câbles Berthoud-Borel. Câbles Brooks. Câbles Fortin-Herrmann 106

CHAPITRE III

REVÊTEMENT EXTÉRIEUR

§ 1er. Chanvre. — Préparation. — Résistance mécanique. — Machines à recouvrir les âmes de chanvre. 111
§ 2. Armature en fer. — Essais des fils de fer à la traction, à la torsion. — Machines à recouvrir d'une armature en fils de fer les câbles de grands fonds, intermédiaires, d'atterrissement. 114
§ 3. Enveloppes de toile et composition bitumineuse. 137

CHAPITRE IV

CABLES DIVERS. — ESSAIS

§ 1er. Câbles à plusieurs conducteurs. 146
§ 2. Essais de la résistance des câbles à la traction. 148
§ 3. Câbles légers : câbles Baudoin, Allan, Siemens, Duncan, Rowett, flottants, Blondot et Bourdin, Trott et Hamilton. — Conclusions 151

CHAPITRE V

ÉPISSURES

§ 1er. Soudure des âmes. — Outillage. — Jonction des conducteurs en cuivre. — Soudure de l'enveloppe isolante : gutta-percha, caoutchouc. 160
§ 2. Epissure des armatures en fer. 171

Table donnant les spécifications de câbles immergés. 174

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TROISIÈME PARTIE

IMMERSION ET RÉPARATION DES CABLES SOUS-MARINS

CHAPITRE VI

MACHINERIE

§ 1er. Navires télégraphiques. 177
§ 2. Cuves. — Lovage des câbles. — Changement de cuve durant l'immersion d'un câble. — Calcul de la longueur de câble lové dans une cuve. 181
§ 3. Machines de pose. — Appareils de retenue. — Tambour. — Frein. — Dynamomètre ; appareil enregistreur des tensions. — Machine à vapeur. — Roue d'immersion. 188
§ 4. Machines de relèvement. — Passage d'un câble de l'arrière à l'avant du navire ou inversement. 201

CHAPITRE VII

ENGINS DIVERS

§ 1er. Cordages pour bouées et pour dragues. — Maillons de jonction 207
§ 2. Chaines en fer 212
§ 3. Champignons. 212
§ 4. Grappins divers ; — de M. A. Jamieson ; — de M. Lambert ; — de M. Kingsford. 213
§ 5. Bouées. — Immersion d'une bouée. — Relèvement d'une bouée. 221

CHAPITRE VIII

SONDAGES ET EXPLORATIONS SOUS-MARINES

§ 1er. Sondages. — Machine à sonder de sir W. Thomson. — Plombs de sonde. — Sondages volants. — Bathomètre. 234
§ 2. Température des eaux de la mer. — Thermomètres de Casella-Miller, de Siemens ; enregistreurs automatiques de Neumayer, de Michaëlis. — Croisières scientifiques 247

CHAPITRE IX

IMMERSION DES CABLES SOUS-MARINS

§ 1er. Généralités 259
§ 2. Pose des câbles d'atterrissement. 260
§ 3. Théorie mécanique de l'immersion des câbles 266
§ 4. Immersion des câbles de grands fonds. 275

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE X

RÉPARATION DES CABLES SOUS-MARINS

§ 1er. Causes des avaries : causes naturelles ; — ancres des navires et engins de pêche ; — animaux sous-marins ; — fautes latentes ; — décharges d'électricité atmosphérique 282
§ 2. Opérations à la mer 294

QUATRIÈME PARTIE

ESSAIS ÉLECTRIQUES DES CABLES SOUS-MARINS
RECHERCHE DES DÉFAUTS

CHAPITRE XI

INSTRUMENTS DE MESURE

§ 1er. Galvanomètres — de Clark, — ordinaires à miroir, — astatiques différentiels, — apériodiques de Thomson, de Deprez et d'Arsonval, — marins, — balistiques. — Figure de mérite des galvanomètres. — Shunts 308
§ 2. Electromètre à quadrants de sir W. Thomson. — Principe de l'appareil. — Description : jauge, rechargeur, plaque d'induction. — Mise en station 323
§ 3. Caisses de résistances, — ordinaires, — pour pont de Wheatstone, — à cadrans, — à arêtes de poisson, — à curseur, — de Thomson et Varley. 331
§ 4. Condensateurs 336
§ 5. Clefs et appareils divers. — Clef à court circuit. — Interrupteur. — Double clef. — Clefs de décharge. — Commutateurs inverseurs. 337
§ 6. Piles. 342

CHAPITRE XII

MESURES ÉLECTRIQUES DES PILES ET DES GALVANOMÈTRES

§ 1er. Résistance intérieure des piles. — Méthode de la demi-déviation, — de Thomson, — de Mance, — d'opposition. — Mesure par l'électromètre. 345
§ 2. Résistance des galvanomètres. — Méthode ordinaire, — de la demi-déviation, — des déviations égales, — de Thomson, — déduite de la mesure d'un shunt. — Figure de mérite des galvanomètres 348
§ 3. Force électromotrice des piles. — Mesure par l'électromètre. — Méthode des déviations égales, — de Wiedemann, — de Wheatstone, — de Poggendorff, — de Clark, — de Lacoine, — de Laws. — Mesure par la caisse de résistances à curseur 351

CHAPITRE XIII

MESURES ÉLECTRIQUES DES CABLES SOUS-MARINS

§ 1er. Résistance du conducteur. — Mesure par le galvanomètre, — par l'électromètre, — par substitution, — par le pont de Wheatstone, — par la caisse de résistances à curseur de Thomson et Varley 359

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cas particuliers divers. — Faux zéro 362
Mesure de très petites résistances, — d'un grand nombre de résistances à peu près égales 367
§ 2. Isolement. — Méthode du pont de Wheatstone, — de Siemens ; perte de charge. — Méthode de substitution : constante, pertes par les appareils et les fils de secours, courant naturel du câble, électrification, décharge. Exemple numérique. — Méthode de Jenkin par l'électromètre : principe, mode d'opération ; exemple numérique 369
Résistance spécifique du diélectrique 385
§ 3. Capacité électrostatique. — Mesure par comparaison directe. — Méthode de Siemens, — de Gott, — de Thomson 385
Capacité électrostatique spécifique 390
§ 4. Essais des soudures. — Méthode d'accumulation avec le galvanomètre, — l'électromètre. 391
§ 5. Essais pendant l'immersion des câbles. — Méthode de la Cie de Silvertown ; — de W. Smith 392
§ 6. Types de carnets en usage pour l'inscription des résultats des divers essais. 398

CHAPITRE XIV

DÉTERMINATION DE LA POSITION DES FAUTES

§ 1er. Classification des fautes. — Systèmes de protection électrique. — Courants du câble, de polarisation, telluriques 403
§ 2. Le conducteur est en contact avec la mer sans être rompu. — Méthode de Blavier, — d'Anderson et Kennelly, — de Clark, — de Lacoine, — de Siemens, — d'Ayrton et Perry, — de Jenkin. — Corrections de Hockin. 410
Essais par la boucle : méthode de Murray. — de Varley. — Correction de Taylor. 426
Méthode de Warren. 430
§ 3. Le conducteur est en contact avec la mer et rompu. — Mesure par le pont de Wheatstone, — par la chute des potentiels. — Méthode de Lumsden, — de Clark, — de Kempe, — de Mance, — de Kennelly. 431
§ 4. Le conducteur est rompu ou présente en un de ses points une très grande résistance, sans être en contact avec la mer. — 1er cas. Méthodes ordinaires ; système Raynaud. — 2e cas. Méthode d'Ayrton et Perry 448
§ 5. Détermination des positions de deux fautes existant simultanément dans un câble. 457

Résultats des essais électriques faits sur des câbles sous-marins, après leur immersion 459

CINQUIÈME PARTIE

EXPLOITATION DES LIGNES SOUS-MARINES

CHAPITRE XV

THÉORIE DE LA TRANSMISSION DES SIGNAUX DANS LES CABLES SOUS-MARINS

§ 1er. Propagation du flux électrique dans un conducteur cylindrique limité pen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dant la période variable. — Signaux bridés. — Emploi de condensateurs intercalés entre la ligne et les appareils de réception ou de transmission. — Alphabets. . . . 462
Application au câble atlantique français de 1869. 477
§ 2. Vitesse de transmission des signaux. — Vitesse absolue de l'électricité . . . 481

CHAPITRE XVI

APPAREILS DE TRANSMISSION. — INSTALLATIONS DES POSTES

§ 1er. Relais et systèmes spéciaux de décharge des câbles. — Relais de décharge. — Bobines auxiliaires de décharge. — Manipulateur Morse à décharge : système Lacoine, système Farjou. — Appareil Hughes avec décharge. — Relais Brown-Allan. — Relais Rambaud. — Relais d'Arlincourt-Willot avec décharge, système Rambaud. — Phono-signal Ader. 487
§ 2. Récepteurs à miroir. — Installation des postes; contrôle des transmissions au départ, clef de Saunders, radiomètre de Crookes 504
§ 3. Siphon-recorder de sir W. Thomson : bobine et électro-aimant; siphon; inscription des signaux; moulinet électrique. — Installation de l'appareil et communications dans les postes de départ et d'arrivée. — Clef de Smith, — de Dickenson. — Ondulateur de Lauritzen. 509
§ 4. Transmissions duplex. — Méthodes Muirhead, — Anderson et Harwood, — Stearns, — Ailhaud : description, réglage, transmission automatique système Belz et Brahic. 526
Transmission quadruplex 544

CONCLUSION 546

INDEX ALPHABÉTIQUE 549

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

AVANT-PROPOS

La faveur avec laquelle ont été accueillis les articles que nous avons publiés en 1887-1888 sur la télégraphie sous-marine dans le journal *la Lumière électrique*, nous a engagé à les réunir en un volume que nous présentons aujourd'hui au public.

La division générale de l'ouvrage a été conservée; mais des additions importantes, parmi lesquelles nous citerons notamment la description des nouveaux plombs de sonde de M. Stallibrass, celle des thermomètres de M. le Dr Michaëlis destinés à enregistrer automatiquement la température de la mer, à toutes profondeurs, etc., ont été apportées à la troisième partie. Les quatrième et cinquième parties ont été presque entièrement refondues : des méthodes d'essais nouvelles, dont quelques-unes presque inédites encore, y ont été introduites; les appareils et systèmes de transmission des signaux ont été complétés, de manière à tenir le lecteur au courant des derniers progrès réalisés dans la science.

Au cours de notre travail, nous nous sommes efforcé de conserver une impartialité absolue vis-à-vis des hommes éminents, quelle que soit leur nationalité, qui ont contribué à fonder cette nouvelle branche de l'industrie électrique, de manière à rendre à chacun la part qui lui est légitimement due dans l'œuvre commune.

Nous avons de même indiqué en notes, autant que possible, les sources auxquelles nous avons puisé une partie de nos renseignements, avec les indications nécessaires pour permettre au lecteur d'y recourir lui-même facilement, s'il le juge nécessaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En terminant, nous adresserons nos remerciements les plus cordiaux à toutes les personnes qui ont bien voulu nous communiquer quelque système nouveau ou encore peu connu dont nous avons pu enrichir notre ouvrage : nous nous faisons un agréable devoir de citer à cet égard notamment MM. les professeurs Ayrton et Perry, Emile Lacoine, Belz, Dr A. Tobler, etc. Nous saisissons aussi avec empressement cette occasion pour remercier publiquement notre jeune collègue et ami M. Pelletier du concours qu'il nous a prêté pour la confection d'une partie de nos dessins et la correction des premières épreuves de notre travail.

Paris, le 19 août 1888.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

INTRODUCTION

L'idée de transmettre la pensée au delà des mers par le fluide électrique, ce merveilleux agent qui nous réserve tous les jours de nouvelles surprises, bien que remontant aux premières années de ce siècle, ne fut cependant réalisée d'une manière effective que bien plus tard, lorsque l'application de la vapeur à l'industrie des transports et la construction des premiers télégraphes électriques eurent rendu plus étroites les relations des peuples entre eux. Bien des déceptions toutefois attendaient les pionniers de cette œuvre nouvelle, et les ruines financières qui s'accumulèrent en quelques années atteignirent de telles proportions que, sans la persévérante énergie de quelques hommes résolus à triompher de tous les obstacles et le génie de savants éminents qui, pendant des années, poursuivirent sans relâche la solution des questions si délicates que soulevait cette nouvelle application de la science, la télégraphie sous-marine n'eût sans doute pas survécu à ses premiers échecs. Par un admirable enchaînement des choses, l'industrie, qui avait été sauvée par la science, rendit à celle-ci les services qu'elle en avait reçus et contribua à lui faire faire des progrès que, livrée à ses propres forces, elle n'eût sans doute pu réaliser qu'après bien des années.

Aujourd'hui, la télégraphie sous-marine, bien que susceptible de nombreux perfectionnements encore, a, comme les autres sciences appliquées, ses lois et ses règles ; si les travaux qu'elle nécessite sont compliqués par l'élément redoutable au milieu duquel ils s'exécutent, et présentent encore bien des difficultés et même parfois bien des dangers [1], ces difficultés ne sont pas insurmontables, et les centaines de millions qui sont engagées

[1] Le navire *La Plata* en se rendant de Londres dans l'Amérique du Sud pour poser un câble sur les côtes du Brésil, s'est perdu, corps et biens, au large de l'île d'Ouessant, au mois de novembre 1874, la nature spéciale de son chargement n'ayant pas permis de l'alléger suffisamment vite, durant un ouragan qui détermina une voie d'eau dans sa coque.

Quelques mois auparavant, le *Gomos* qui devait effectuer le même travail avait sombré sur les côtes du Brésil : le *Robert Lowe*, en 1873, dans les parages de Terre-Neuve, et le *Volta*, de l'*Eastern telegraph C^o*, en 1887, dans l'Archipel, ont subi le même sort.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans ce genre d'entreprises témoignent à la fois de ses succès, de la confiance qu'elle inspire et des services qu'elle rend à l'humanité.

Un exposé complet de l'art de construire, de réparer et d'exploiter les lignes télégraphiques sous-marines peut être divisé en cinq parties comprenant :

1° L'histoire de la télégraphie sous-marine, depuis ses origines jusqu'à l'immersion du troisième câble atlantique, en 1866, date à laquelle on peut considérer comme se terminant la période des premiers tâtonnements ;

2° La composition et la fabrication des câbles sous-marins ;

3° Les procédés et engins se rapportant tant à leur immersion qu'à leur réparation ;

4° Les instruments et méthodes d'essais servant à constater leur état électrique en cours de fabrication ou d'immersion et à localiser les défauts survenus accidentellement après la pose ;

5° Enfin, les appareils et systèmes employés pour l'échange des signaux sur les longues lignes sous-marines.

C'est cet ordre que nous suivrons dans notre ouvrage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TRAITÉ

DE

TÉLÉGRAPHIE SOUS-MARINE

PREMIÈRE PARTIE

HISTORIQUE

L'origine de la télégraphie sous-marine remonte à des expériences sur l'inflammation à distance de la poudre que le professeur russe Sœmmering exécuta à Saint-Pétersbourg, vers 1807 ou 1808, et qu'il répéta, en 1813, sur un fil conducteur immergé dans la Seine, à Paris.

Sœmmering, ayant inventé peu après son télégraphe à décomposition électro-chimique de l'eau, proposa de relier Cronstadt à Saint-Pétersbourg par une ligne sous-marine; mais ce projet n'eut aucune suite.

En 1839, le docteur O'Shaughnessy fit une série d'expériences, dont on retrouve les détails dans les comptes rendus de la Société asiatique de Londres, pour faire traverser au courant électrique les fleuves et les mers. Il employait des fils recouverts de poix et de chanvre goudronné et constata « que, même sous l'eau, ces fils transmettaient, sans perte appréciable, les signaux électriques ».

Le professeur Ch. Wheatstone, de son côté, songeait, dès 1837, à relier l'Angleterre au continent par une ligne sous-marine et à transmettre des messages à l'aide de l'appareil à aiguilles qu'il venait d'inventer avec Cooke. Il exposa, le 6 février 1840, devant une commission de la Chambre des communes, les moyens à l'aide desquels il serait possible d'établir une communication télégraphique sous-marine entre Douvres et Calais.

Après avoir fait à l'Observatoire de Bruxelles quelques essais dont les résultats lui parurent suffisamment concluants, Wheatstone arrêta tous les détails de l'œuvre qu'il se proposait d'entreprendre. Le câble devait être composé de sept conducteurs en cuivre formant chacun l'âme d'une corde de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chanvre bien imbibé de goudron bouilli ; toutes ces cordes devaient être tordues ensemble et recouvertes de chanvre préparé de la même manière. Wheatstone exécuta deux dessins [1] donnant, le premier (fig. 1), les plans et coupes des machines destinées :

1° A revêtir les fils conducteurs de leur enveloppe isolante ;

2° A corder ensemble sept fils semblables ;

3° A recouvrir le faisceau de ces sept fils d'une enveloppe de chanvre de manière à en former un câble.

En sortant de chacune de ces machines, le câble devait passer dans un bain de matière isolante et finalement être amené à bord du navire.

Le second dessin (fig. 2) donnait :

1° Les plan et profil du détroit du Pas-de-Calais entre la pointe South Foreland et le cap Gris-Nez, points de départ et d'arrivée du câble projeté ;

2° Une vue de la barque chargée de câble, avec son remorqueur, durant le déroulement ;

3° Les plan et élévation des tambours sur lesquels le câble devait être lové à bord et de la poulie d'immersion qui devait être placée à l'arrière de la barque ;

4° La manière de souder l'un à l'autre les bouts des sections de câble enroulées sur les différents tambours ;

5° Une vue du navire à vapeur glissant sous le câble pour la recherche d'un défaut ;

6° Enfin, une coupe et une vue perspective du câble.

Wheatstone fit, en 1844, dans la baie de Swansea, des expériences variées sur ce mode de communication et put échanger, du bateau où il se trouvait, des signaux avec un phare voisin.

Dès que la gutta-percha eut fait son apparition en Angleterre, Wheatstone songea (1845) à en faire usage pour la fabrication de ses câbles, qu'il se proposait alors d'enfermer dans un tuyau de plomb. Mais il ne put faire que des essais insuffisants et ne réussit pas à trouver un moyen d'appliquer cette matière isolante sur le fil conducteur.

Le professeur Morse, l'inventeur bien connu de l'appareil télégraphique qui porte son nom, se préoccupait de la même question ; en 1842, il immergea dans le port de New-York un fil de cuivre isolé dans lequel il fit circuler un courant électrique. L'année suivante, il soumit au secrétaire de la Trésorerie des États-Unis un projet d'établissement d'une communication télégraphique entre l'Amérique et l'Europe.

En 1845, Ezra Cornell immergea dans la rivière de l'Hudson un câble de douze milles de longueur pour relier le fort Lee à la ville de New-York. Le

[1] Nous reproduisons ces dessins d'après des photographies qui en ont été publiées en 1877 par M. Sabine, gendre de feu Wheatstone, dans le *Journal of the Society of telegraph Engineers*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

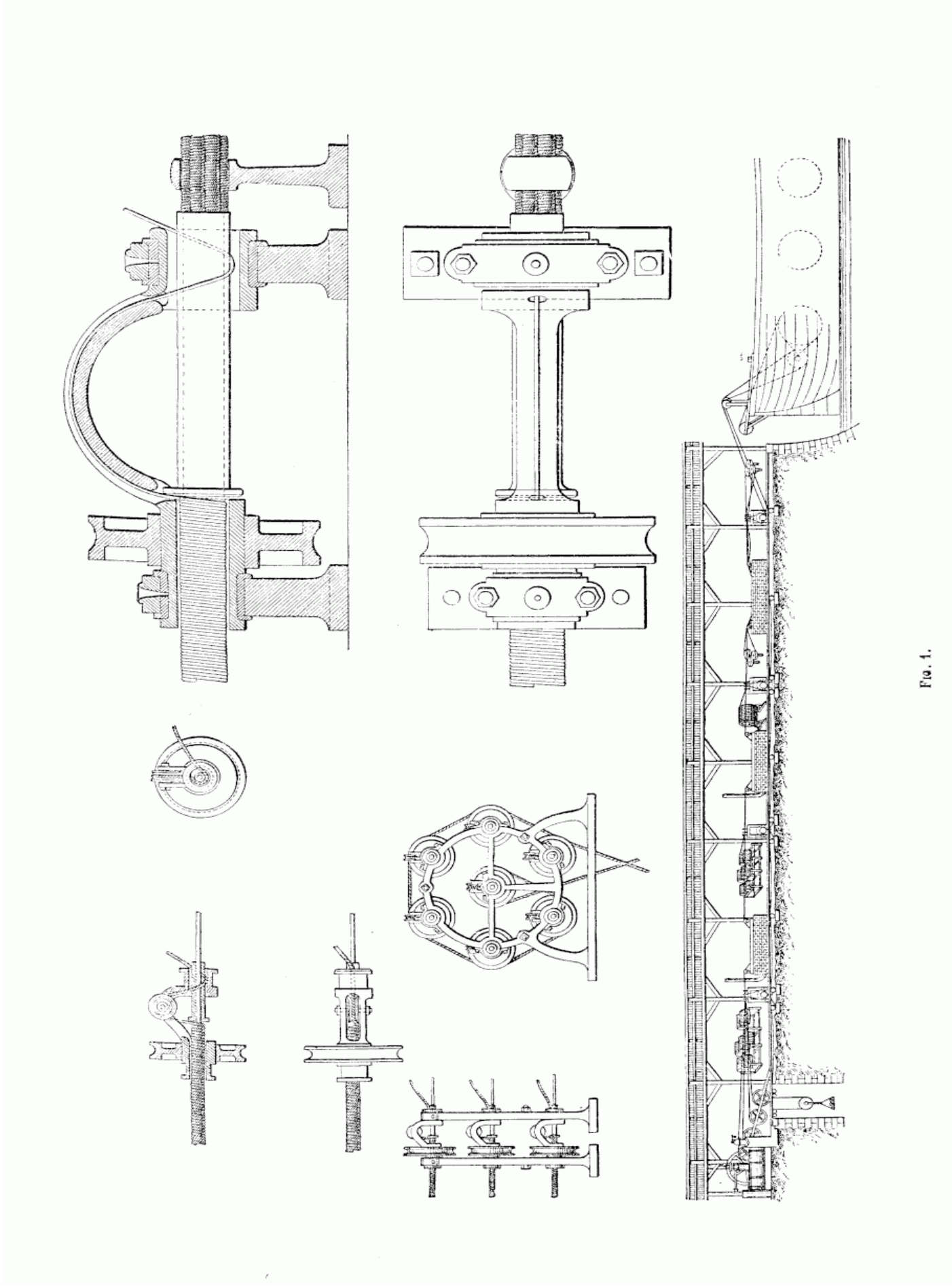


Fig. 1.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

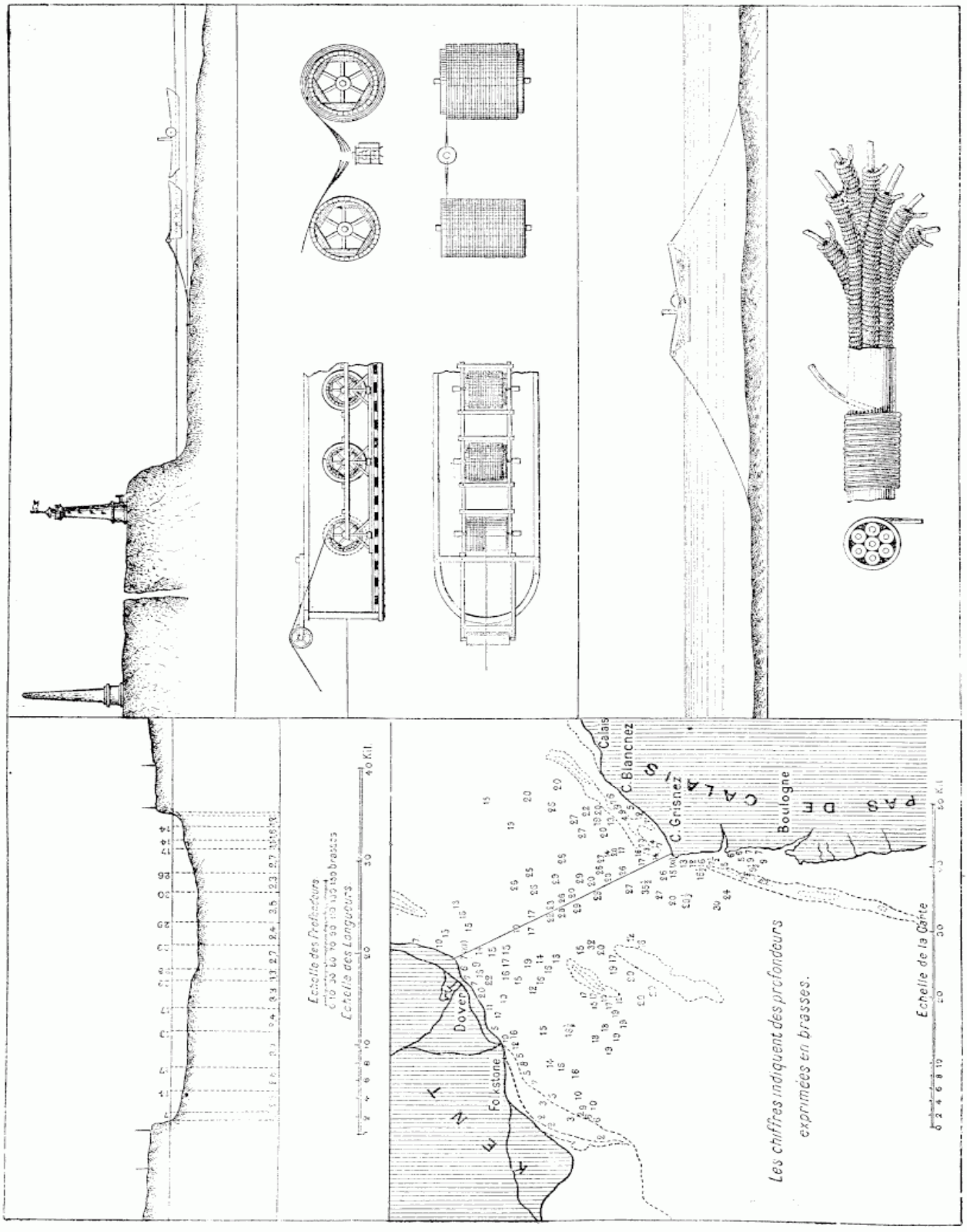


Fig. 2.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

câble était composé de deux fils de cuivre entourés séparément de coton, isolés à l'aide de caoutchouc et enfermés dans un même tuyau en plomb. Le câble fonctionna convenablement pendant plusieurs mois, mais fut coupé par les glaces en 1846.

M. West, après avoir demandé aux gouvernements anglais et français l'autorisation d'établir une communication sous-marine entre Douvres et Calais, déroula à la main dans le port de Portsmouth, en 1846, en présence d'une nombreuse assistance, un fil conducteur isolé au caoutchouc et put télégraphier à terre.

Deux essais d'immersion de fils isolés à la gutta-percha eurent lieu dans des pays différents dans le courant de l'année 1848. L'un fut fait en Amérique, dans la rivière d'Hudson, par Armstrong qui, encouragé par ce premier succès, proposa, sans tarder, dans le *Journal du Commerce de New-York*, de poser un câble semblable au fond de l'océan Atlantique; le second eut lieu par les soins du Dr Werner Siemens, dans le port de Kiel, pour l'inflammation de torpilles sous-marines.

Le 10 janvier 1849, enfin, M. Walker immergea un câble recouvert de gutta-percha, de deux milles de longueur, dans la Manche, à partir de la plage de Folkestone : le câble fut relié à une ligne aérienne de 83 milles de longueur qui suivait le chemin de fer du South-Eastern, et M. Walker, qui se trouvait en mer, à bord du bateau *la Princesse Clémentine*, put échanger des dépêches avec Londres.

Dès l'année 1847, cependant, M. John Watkins Brett avait obtenu du gouvernement français un privilège pour l'établissement d'un télégraphe sous-marin entre la France et l'Angleterre. La convention n'ayant reçu aucun commencement même d'exécution, dans les délais qui avaient été stipulés, se trouva annulée ; mais elle fut renouvelée le 10 août 1849 pour une période de dix ans, sous la condition que la communication serait établie au plus tard le 1er septembre 1850. Une compagnie se constitua sous le nom de *Compagnie du télégraphe sous-marin de la Manche* et fit fabriquer vingt-cinq milles marins d'un câble composé d'un conducteur central en cuivre de 2 millimètres de diamètre recouvert de gutta-percha de 12,5 millimètres de diamètre[1]. La gutta-percha était appliquée en une seule couche sur des fils non recuits de 100 yards[2] de longueur. On réunissait ensemble ces diverses pièces en tordant les bouts des fils de cuivre deux à deux l'un autour de l'autre et soudant à l'étain la torsade ; par-dessus on appliquait la gutta-percha rendue plastique en la chauffant à une température convenable et on la comprimait dans un moule en bois. Les jonctions avaient environ 5 centimètres de

[1] *A resumee of the earliest days of submarine telegraphy*, par M. Willoughby Smith. London, 1881.

[2] Le yard vaut 0,914 mètre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

diamètre. Les glaînes ainsi formées, de longueurs facilement transportables, étaient simplement plongées dans de l'eau et essayées avec une pile à sable de vingt-quatre éléments : si l'on n'observait à un galvanomètre assez grossier aucune déviation sérieuse, la glaîne était reçue, envoyée à bord et soudée à la partie déjà fabriquée du câble, laquelle était enroulée sur un grand tambour en fer. Ce tambour mobile autour d'un axe horizontal était placé sur le pont du *Goliath*, grand chaland du port de Douvres. Le nombre et les dimensions des joints ne permettant pas un lovage régulier du câble sur le tambour, on remplissait les vides avec de la bourre de coton : de petites lattes en bois, placées suivant des génératrices du tambour, séparaient les différentes couches de câble les unes des autres.

On immergea d'abord le câble d'atterrissement, à partir de la côte anglaise, jusqu'à l'extrémité d'une estacade établie dans le nouveau port de Douvres, et, à partir de la côte française, jusqu'au delà du banc de roches qui s'étend assez loin dans la mer, en avant du cap Gris-Nez. Ce câble d'atterrissement se composait d'un conducteur en cuivre de 1,6 millimètre de diamètre recouvert de coton imprégné d'une solution de caoutchouc ; le tout était enfermé dans un tuyau en plomb très épais.

Le 23 août 1850, au jour, le *Goliath* remorqué par un petit navire à vapeur et escorté par le *Widgeon*, navire de guerre qui devait indiquer la route, quitta le port de Douvres ; l'extrémité du câble d'atterrissement ayant été relevée dans une embarcation et soudée au câble principal, le déroulement de celui-ci commença. Tous les cent mètres, un poids en plomb, de sept à onze kilogrammes, suivant la nature et la profondeur du fond, fut attaché au câble ; ces poids étaient faits de deux pièces reliées par des goujons que l'on ne pouvait mettre en place qu'en stoppant chaque fois le navire. Le temps était beau et le déroulement ne donna lieu qu'à quelques incidents, sans gravité d'ailleurs, dus à des lattes qui s'étaient soulevées inopportunément lorsqu'elles n'étaient plus engagées sous le câble que par l'une de leurs extrémités. Le *Goliath* jeta l'ancre à six heures du soir, à côté de la bouée qui marquait l'extrémité du câble d'atterrissement, près de la côte française : avant de le souder au câble principal, on essaya à bord de correspondre avec Douvres, à l'aide d'un appareil imprimeur de House, modifié par M. Brett, qui devait donner, imprimées en caractères romains, soixante dépêches de quinze mots à l'heure. Quelques lettres apparurent en effet çà et là sur la bande de papier, mais sans former une suite de mots intelligible. La nuit approchant, on suspendit ces expériences et on fit, dans une embarcation, la soudure des deux bouts du câble. Un appareil à aiguilles du système Cooke et Wheatstone fut mis en communication avec la ligne, dans les bâtiments du phare du cap Gris-Nez et pendant plusieurs heures on attendit avec anxiété, mais en vain,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'arrivée de signaux de Douvres. La situation ne s'étant pas modifiée le lendemain, il devint manifeste que le câble était rompu : on chercha à le relever aux environs de l'épissure finale, mais le poids de la gaîne de plomb rendit toutes ces tentatives infructueuses, et la ligne dut être abandonnée.

L'œuvre tentée par MM. Brett, Read, Willoughby Smith et F. C. Webb pour faciliter les relations de leur pays avec le continent, n'était cependant pas entièrement perdue : la possibilité de l'immersion d'un câble dans la Manche et du passage des signaux électriques était pratiquement démontrée. Il ne restait qu'à trouver des moyens satisfaisants pour protéger le fil conducteur et son enveloppe isolante durant et après son immersion. Le problème, une fois nettement posé, devait être résolu rapidement.

Le 19 décembre 1850, M. John Brett obtint du gouvernement français, aux mêmes conditions que précédemment, une nouvelle concession de

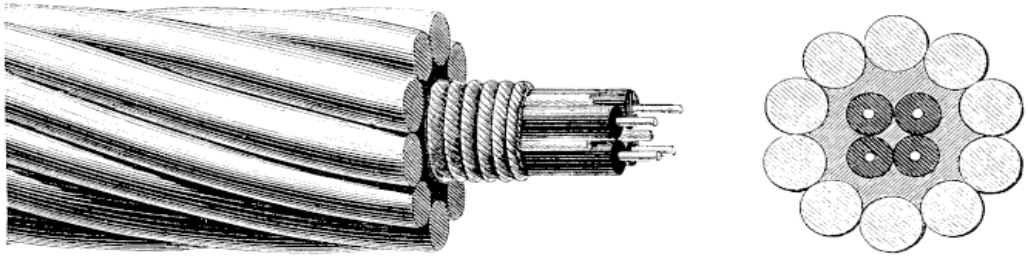


Fig. 3.

dix ans, courant du 1er octobre 1851, et valable seulement si, à cette date, la ligne sous-marine était en état de fonctionner. Mais l'insuccès du mois d'août précédent avait rendu les capitaux plus défiants et sept semaines avant l'expiration du délai fixé par l'acte de concession, les fonds nécessaires à l'exécution des travaux n'étaient pas encore souscrits. L'entreprise fut sauvée grâce à l'énergie et aux talents d'un homme, M. Crampton, dont le nom mérite d'être conservé dans l'histoire des premiers temps de la télégraphie sous-marine. M. Crampton réunit le capital nécessaire (375,000 francs dont il avança personnellement la moitié), arrêta le type du câble à immerger, type dont les grandes lignes n'ont plus varié depuis lors, fit construire ce câble dans les usines de MM. Newall et Cie, et le 25 septembre 1851 le posa avec succès au fond de la Manche.

Le câble (fig. 3) se composait de quatre fils en cuivre de 1,65 millimètre de diamètre, recouverts chacun de deux couches de gutta-percha de 6,2 millimètres de diamètre ; les quatre conducteurs ainsi isolés étaient tordus l'un autour de l'autre, des fils de chanvre goudronné remplissant les vides que laissaient entre elles les quatre âmes ; par-dessus était enroulée, à angle droit, une cordelette de bitord goudronné. Le tout était recouvert de dix fils de fer galvanisés de 7 millimètres de diamètre enroulés en hélice à long

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pas. L'armature en fer était destinée à protéger les fils conducteurs contre les chocs et les frottements qui avaient amené la destruction si rapide du câble de l'année précédente.

Ce câble pesait environ sept tonnes par mille : il fut embarqué sur un ponton appartenant au gouvernement anglais, *le Blazer,* qui fut remorqué par deux navires à vapeur. Un troisième remorqueur servant de rechange et un navire de guerre chargé de donner la route accompagnaient l'expédition.

L'immersion eut lieu entre les caps Southerland et Sangate, mais ne fut pas favorisée par le temps comme précédemment; le câble, entraîné par son poids au fond de la mer dont la profondeur ne dépasse cependant pas quarante brasses dans ces parages, se déroulait assez rapidement ; d'un

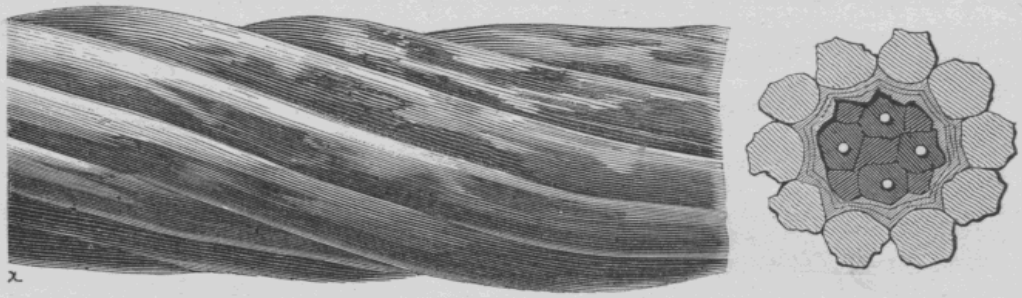


FIG. 4.

autre côté, les remorqueurs, dérivés par le vent et les courants et retenus à l'arrière par le câble, ne purent se diriger en ligne droite vers le cap Sangate ; aussi les navires arrivèrent à un mille des côtes de France n'ayant plus de câble à bord. On compléta provisoirement la communication à l'aide de trois fils recouverts seulement de gutta-percha et tordus ensemble ; ce bout de ligne fut remplacé le 19 octobre suivant par du câble semblable à celui qui avait été immergé par le *Blazer*, et le 13 novembre la ligne fut ouverte au public.

Ce câble, qui a subi de nombreuses et importantes réparations, n'a jamais été intégralement renouvelé. La figure 4 en représente un morceau relevé en 1859 après huit années de séjour dans l'eau ; les fils de fer de l'armature étaient déjà partiellement rongés, mais aujourd'hui même la gutta-percha qu'on en retrouve est en parfait état de conservation encore.

Le succès obtenu par le câble de M. Crampton donna subitement un essor considérable à la télégraphie sous-marine : de tous côtés surgirent des entreprises analogues, mais bien des désastres devaient se produire avant que ces opérations pussent être considérées comme entrées dans le domaine courant de l'industrie.

Trois tentatives infructueuses furent notamment faites, dès l'année sui-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vante, pour mettre l'Irlande en communication avec l'Angleterre. La première eut lieu entre Holyhead et Howth; on employa un câble du modèle de celui de Douvres; mais ce câble était si mal isolé, faute d'avoir été essayé sous l'eau, qu'il ne put laisser passer les signaux et tous les efforts faits pour le relever et le réparer restèrent sans résultat.

La deuxième tentative eut lieu entre Portpatrick et Donaghadee; le câble se composait d'un conducteur central en cuivre recouvert d'abord de caoutchouc, puis de gutta-percha, enfin de chanvre. Des courants très rapides entraînèrent hors de leur route les navires chargés de l'immersion et l'opération fut abandonnée.

La troisième tentative eut lieu entre les deux mêmes points, avec un câble construit sur le type de celui de Douvres. Un temps défavorable joint à des moyens insuffisants pour arrêter ou ralentir le déroulement d'un câble aussi lourd augmentèrent la dépense de câble au delà des prévisions des ingénieurs et on ne put atteindre la terre.

On peut présumer l'avenir qui eût été réservé à la télégraphie sous-marine, si ces trois échecs avaient précédé l'établissement de la ligne de Douvres à Calais.

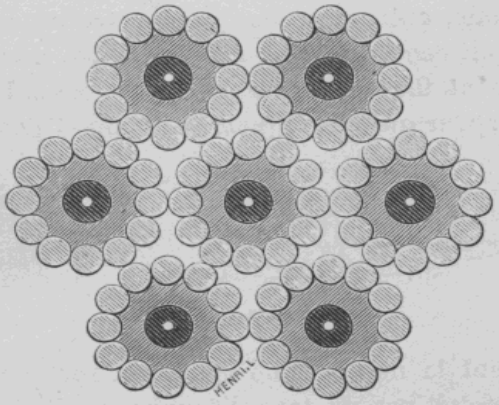


Fig. 5.

En 1853, un gros câble à plusieurs conducteurs fut néanmoins posé avec succès entre Portpatrick et Donaghadee. Sept petits câbles (fig. 5), réunis en faisceaux aux atterrissements seulement, relièrent en outre l'Angleterre à la Hollande, et un gros câble multiple fut immergé entre Douvres et Ostende. Les années suivantes, la Suède fut mise en communication avec le Danemarck, la Corse avec l'Italie et la Sardaigne, celle-ci avec l'Afrique et enfin l'Irlande avec l'Amérique.

Parmi toutes ces nombreuses communications, nous n'étudierons plus que celles qui, par l'importance des résultats obtenus ou la grandeur des difficultés vaincues, ont marqué une étape dans l'histoire de la science.

CABLES DE LA SPEZZIA A LA CORSE ET DE LA SARDAIGNE A BONE

Ces câbles, en y ajoutant une petite ligne sous-marine entre la Corse et la Sardaigne, et des lignes aériennes construites dans les deux îles, devaient constituer une communication entre la France et l'Algérie. Le câble de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Spezzia et celui de Bonifacio comprenaient (fig. 6) six fils conducteurs et étaient recouverts d'une armature de treize fils de fer de 8 millimètres de diamètre; leur poids était de neuf tonnes par mille. Les fonds atteignant près de cinq cents brasses entre la Corse et Gênes, M. Brett plaça à la suite l'un de l'autre deux tambours (fig. 7), munis de doubles rebords, sur chacun desquels il enroula cinq tours de câble. Il créa ainsi une sorte de frein qui lui permit de poser sans difficulté les deux premiers câbles dans le courant de l'année 1854.

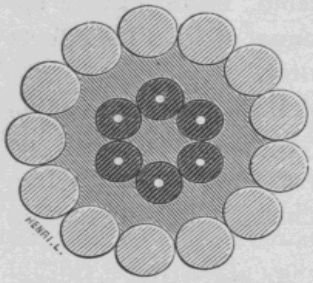


Fig. 6.

Une tentative fut faite peu après, pour immerger un câble semblable entre Cagliari et Bône. Mais, entre ces deux points, on rencontre des profondeurs de seize à dix-huit cents brasses : aussi le câble dont on ne pouvait modérer le déroulement fila avec une grande vitesse. La marche du *Tartare*, petit navire à vapeur qui remorquait le bâtiment porteur du câble, n'ayant pu d'un autre côté être augmentée, on reconnut bientôt l'impossibilité d'atteindre les côtes de Sardaigne avec la longueur de câble restant à bord. L'opération avait été suspendue, comme d'habitude, durant la nuit, et l'on délibérait sur le parti à prendre, lorsque le câble, qui passait par un trou d'écubier où il se trouvait replié brusquement à angle droit sans interposition d'aucun matelas protecteur, fatigué par le tangage du navire, se rompit subitement.

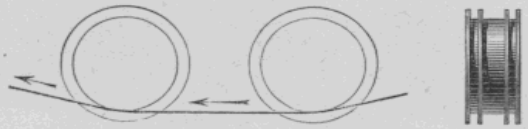


Fig. 7.

L'*Elba*, dirigée par M. F. C. Webb, parvint à relever, à partir de Bône, environ soixante milles de ce câble.

La possibilité de relever et de réparer les câbles immergés dans des eaux profondes était ainsi, pour la première fois, pratiquement démontrée.

Dans une seconde tentative, l'expédition, partie du cap Spartivento, devait se diriger vers l'île de Galite, suivant une route le long de laquelle des sondages préalables avaient fait reconnaître des profondeurs moindres. Mais elle dévia fortuitement de cette route, durant la nuit, en dépensant inutilement du câble et arriva devant l'île de Galite, sur des fonds de quatre cents brasses, ne pouvant atterrir, faute de câble. Le bout venant de la mer fut tourné tout autour du navire, solidement bossé, et un bâtiment se rendit immédiatement à Bône pour y chercher une bouée; on demanda en même temps télégraphiquement à Londres, par la voie du câble même, le supplément nécessaire pour gagner le rivage. Mais au bout de cinq jours, le câble,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

usé sur les pointes des rochers qui le supportaient, par les mouvements incessants de tangage du navire, se brisa.

M. Brett ayant renoncé à poursuivre cette opération, M. Newall la reprit et fabriqua un câble à quatre conducteurs seulement, chaque conducteur se composant d'une cordelette de quatre brins de cuivre tordus ensemble, recouverte séparément de deux couches de gutta-percha. Le faisceau des quatre conducteurs était entouré d'un matelas de chanvre qui était lui-même recouvert de dix-huit fils de fer de 3 millimètres de diamètre, pour le câble destiné à être immergé dans les grands fonds (fig. 8), et de douze fils de fer galvanisés de 5 millimètres (fig. 9) pour les portions qui devaient être placées aux abords des côtes. Le poids du câble de grands fonds était de 1,85 tonne, celui du câble d'atterrissement de 3 tonnes.

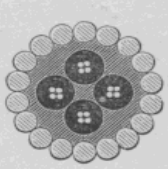


FIG. 8.

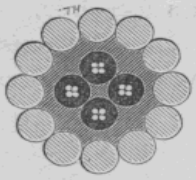


FIG. 9.

Le câble était enroulé, sous le pont, dans une cuve cylindrique en fer

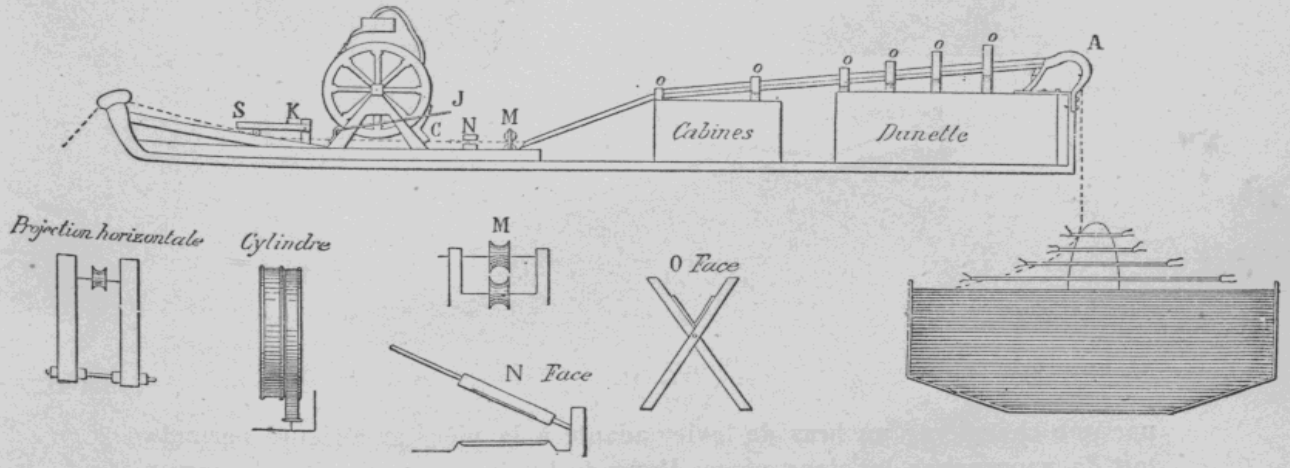


FIG. 10.

dont l'axe était occupé par une sorte de tronc de cône entièrement libre à sa partie supérieure. Quatre cercles en fer, maintenus par des cordes dans des plans parallèles aux couches de câble, forçaient celui-ci à se dérouler dans une position horizontale et empêchaient les coques de se produire. Les deux cercles inférieurs étaient abaissés au fur et à mesure que la hauteur du cylindre de câble diminuait par le déroulement : le dernier se trouvait ainsi toujours à une faible distance du câble et ne permettait aux grandes spires extrêmes de se soulever que partiellement et successivement. En sortant des cercles en fer (fig. 10), le câble passait dans un anneau horizontal dont le centre se trouvait sur le prolongement de l'axe du cône, remon-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tait verticalement pour s'engager dans la gorge d'une pièce en fonte A placée sur la dunette et suivait une gouttière triangulaire en fer soutenue par des chevalets : des planchettes en bois placées sur la gouttière devaient empêcher le câble de s'en échapper, dans le cas où le déroulement viendrait à s'accélérer.

Le câble passait ensuite dans le vide formé par deux roues à gorge superposées M, glissait entre deux pièces en bois N, recouvertes de tôle et liées

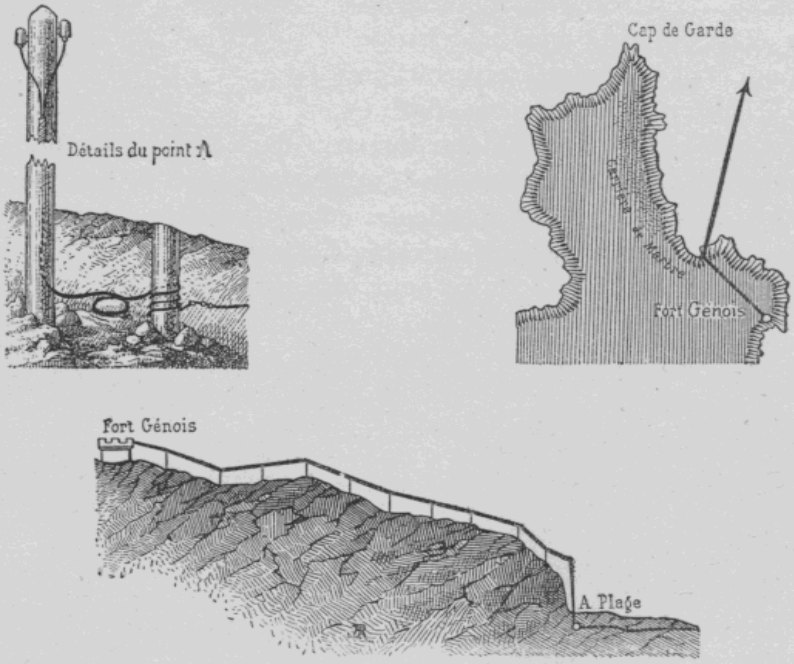


Fig. 11.

par une charnière ; un bras de levier adapté à la pièce supérieure permettait de rapprocher les deux pièces l'une de l'autre et, par suite, de serrer plus ou moins le câble qui se trouvait pincé comme entre les mâchoires d'un étau.

De là, le câble s'engageait dans une gorge conique C qui le forçait à s'appuyer sur le bord extérieur du grand tambour sur lequel il s'enroulait sept fois : un couteau en fer J, fixé aux montants, empêchait la superposition des tours.

Au sortir de ce tambour, le câble passait dans la gorge d'une roue en fonte placée à l'arrière du navire et tombait à la mer.

Le frein destiné à modérer la vitesse de déroulement du câble se composait d'une forte bande en tôle de 0,10 mètre de largeur qui enveloppait toute la circonférence du tambour : un bras en fer qui communiquait le mouve-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment à un levier coudé permettait de serrer plus ou moins vigoureusement la bande de tôle contre le tambour.

Au dernier moment et d'après les conseils du docteur Werner Siemens, on installa, entre le tambour et l'arrière du navire, un dynamomètre composé d'une poulie à gorge qui reposait sur le câble et dont l'axe était soutenu par deux pièces de bois, mobiles elles-mêmes autour d'un axe K. Le câble fléchissant sous le poids de la poulie, on pouvait, par un calcul facile, déduire sa tension de la flèche que l'on observait.

Une caisse à eau, alimentée par une pompe, était placée au-dessus du tambour, et arrosait constamment le câble pour l'empêcher de s'échauffer par le frottement.

Le 7 septembre 1857, une tranchée de 1 mètre de profondeur ayant été creusée au pied du fort Génois (fig. 11), le câble fut amené à terre, solidement attaché à deux poteaux plantés dans le fond de cette tranchée et relié à deux fils télégraphiques aériens qui se rendaient au fort même. A 8 h. 1/2 du soir, l'*Elba*, remorquée par le *Mozambano* et escortée par deux navires de guerre français, partait du cap de Garde, près Bône, en déroulant le câble. Des ruptures de fils de fer de l'enveloppe se produisirent à diverses reprises : ces fils, en se rebroussant, formaient très rapidement autour du câble une sorte d'écheveau métallique qui passait difficilement dans la machinerie ; une fois même le déroulement fut subitement arrêté ainsi, et le câble se fût certainement brisé net, si le navire eût été lancé à ce moment avec une vitesse un peu considérable,

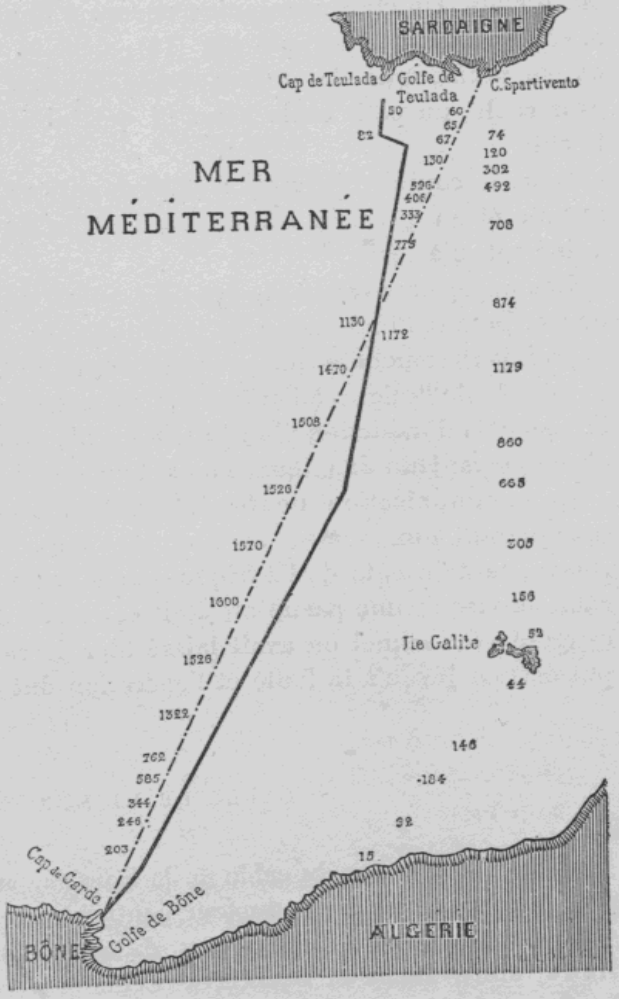


FIG. 12.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La dépense de câble, à la traversée des grandes profondeurs, ayant été supérieure de plus d'un tiers au chemin parcouru, on se décida à changer de route pour gagner le cap Teulada et on porta la vitesse du navire à six nœuds. On était néanmoins encore à douze milles de terre lorsque tout le câble se trouva déroulé (fig. 12); mais la profondeur de la mer n'étant, en ce point, que de quatre-vingts brasses, on souda le lendemain, au gros câble, un petit câble à un fil qui lui-même se brisa à deux milles de la côte.

Dans le courant du mois d'octobre suivant, l'extrémité du gros câble fut relevée et on y souda un nouveau câble du même modèle que l'on conduisit jusqu'à terre.

Des appareils avaient été disposés à bord de l'*Elba* pour vérifier, en permanence, durant l'immersion, la continuité du câble. M. Siemens mesura aussi approximativement le temps qu'employait le courant pour se propager d'une extrémité de la ligne à l'autre (1/4 de seconde du cap Spartivento à Bône) et les effets d'induction d'un fil sur les fils voisins : ces effets disparaissaient en employant un deuxième conducteur comme fil de retour.

La communication ne fut jamais bonne que par deux conducteurs qui manquèrent eux-mêmes au bout de deux ans. En 1860, M. Fl. Jenkin releva, tant du côté de l'Afrique que de celui de la Sardaigne, 57 milles de câble environ; une partie en était couverte de coques provenant du mou exagéré avec lequel on avait laissé filer le câble durant l'immersion : il ne put arriver jusqu'à la faute et l'opération dut être abandonnée.

CABLE DE LA MER NOIRE

Après l'immersion du câble de la Spezzia, en 1855, un câble léger, composé seulement d'un conducteur central en cuivre et d'une enveloppe en gutta-percha de 6,1 millimètres de diamètre, fut immergé dans la mer Noire, entre Varna et Balaklava (Crimée) : aux abords des côtes, sur une longueur de dix milles environ à chaque atterrissement, le câble était recouvert d'une armature métallique. C'est en vue de l'immersion de ce câble que M. Newall fit installer, dans la cuve du navire qui devait servir au déroulement, le cône central et les cercles guides qui ont été décrits plus haut. Le câble, dont la longueur était de 300 milles, avait été posé avec très peu de mou : la communication fut interrompue au bout de dix mois, après la prise de Sébastopol, et on ne chercha pas à la rétablir.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CABLES DE CAGLIARI A MALTE ET DE MALTE A CORFOU

Ces câbles de 500 milles de longueur chacun, immergés en 1857, ne durèrent que fort peu de temps. La section de Cagliari à Malte, réparée une première fois, en 1859, dans le voisinage de la Sicile, vint à manquer six semaines après dans les mêmes parages : de nouvelles tentatives furent faites pour la réparer ; mais, au bout de cinq mois, on abandonna l'opération. L'inégalité brusque des fonds avait fait attribuer les deux ruptures du câble à une action volcanique ; mais il est plus probable qu'elles furent simplement dues à des bateaux de pêche.

La section de Malte à Corfou fut mise hors de service en 1861, durant un violent orage, bien qu'elle fût protégée par des paratonnerres. On constata un isolement du câble, c'est-à-dire une rupture du conducteur sans perte à la terre, par conséquent sans brisure du câble. La faute parut se trouver à une vingtaine de milles environ de Corfou. Quelques parties du câble furent relevées et trouvées en bon état de conservation.

PREMIER CABLE ATLANTIQUE

Le succès qui avait couronné la pose du second câble de Douvres à Calais fit immédiatement renaître l'idée de relier l'Amérique à l'Europe. Ce furent MM. Tebbets, de New-York, et Frédéric N. Gisborne, ingénieur anglais, qui conçurent ce hardi projet et qui, en 1851, obtinrent de la législature de Terre-Neuve, pour la *Compagnie du Télégraphe électrique de Terre-Neuve* qu'ils constituèrent, divers avantages pécuniaires et territoriaux. Cette compagnie fit immerger d'abord douze milles de câble dans la baie de Canso, entre le cap Breton et la frontière de la Nouvelle-Ecosse, point où la ligne sous-marine devait se relier au réseau télégraphique du Canada et des États-Unis ; mais, n'ayant pu remplir ses engagements, elle abandonna sa concession à une nouvelle Société que fonda M. Cyrus W. Field, sous le nom de *Compagnie du Télégraphe de New-York, Terre-Neuve et Londres*. Un acte de la législature du pays (1854) confirma et agrandit ses privilèges, qui comprirent un droit exclusif d'atterrissement dans l'île de Terre-Neuve et sur les côtes du Labrador, pendant une période de cinquante ans.

Un câble de 85 milles de longueur fut posé entre le cap Breton et Terre-Neuve : M. Cyrus W. Field se rendit ensuite (1856) en Angleterre pour y trouver le capital nécessaire à l'établissement de la ligne principale, de l'Irlande à Terre-Neuve. Associé à MM. Brett, Whitehouse et Ch. Bright,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

il fonda une nouvelle Société qui se fusionna bientôt avec la compagnie américaine, sous le nom de *Compagnie du Télégraphe atlantique*, au capital de 8,750,000 francs. M. Whitehouse, physicien attaché à la maison Newall, venait de faire, à l'aide d'un câble à six conducteurs de 166 milles de long, des expériences variées sur les conditions de transmission du courant électrique à de très grandes distances. Il avait constaté, sur des circuits comprenant jusqu'à 1000 milles de fils recouverts, formés en réunissant bout à bout les divers fils du câble à six conducteurs, que l'attraction électromagnétique du courant décroît en raison inverse du carré de la distance, et que, conformément aux lois d'Ohm et de Pouillet, l'intensité du courant diminue en raison inverse de la distance et augmente avec la section du conducteur.

Pour apprécier le retard éprouvé par l'électricité pendant son passage dans les câbles sous-marins, M. Whitehouse avait employé un pendule qui, à chaque oscillation, mettait le fil conducteur en communication avec la source électrique. A l'extrémité opposée de la ligne, le courant actionnait un électro-aimant qui fermait le circuit d'une pile locale et mettait en jeu un appareil électro-chimique. Une bande de papier préparée au cyanure de potassium emportait, en se déroulant d'un mouvement uniforme, des traces bleues qui se développaient au contact du papier avec une pointe en fer fixée à l'armature de l'électro-aimant, lorsque celle-ci était attirée vers le noyau, au moment du passage du courant. M. Whitehouse constata ainsi que le temps nécessaire à un courant électrique pour se rendre d'une extrémité à l'autre de la ligne augmentait un peu plus rapidement que la longueur des conducteurs, mais non proportionnellement au carré de cette longueur, comme la théorie semblait l'indiquer.

M. Whitehouse avait remarqué encore que les signaux peuvent se succéder beaucoup plus rapidement en changeant le sens du courant à chaque émission et que les courants induits se propagent plus rapidement que les courants voltaïques, dans le rapport de 3 à 1. On devait dès lors être conduit à substituer aux piles, sur les très grands câbles, des machines électromagnétiques. L'appareil imaginé à cet effet par M. Whitehouse consistait en une série de cylindres de fer doux, entourés de deux hélices, l'une de gros fil reliée par l'intermédiaire d'un manipulateur à une pile et formant le circuit inducteur, l'autre de fil fin formant le circuit induit et reliée d'une part à la terre, de l'autre à la ligne.

La longueur du câble transatlantique devant dépasser 2,000 milles, une expérience décisive fut jugée nécessaire, pour ne laisser subsister aucune incertitude sur le succès commercial de l'entreprise projetée. Dans la nuit du 9 octobre 1856, MM. Whitehouse et Ch. Bright, qui avait précédemment fait de son côté des essais sur la vitesse de transmission des signaux, en se

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

servant des fils souterrains de la ligne de Londres à Manchester, réunirent bout à bout, à Londres, des fils souterrains et sous-marins de diverses compagnies anglaises, de manière à constituer un circuit de 2000 milles de longueur. Les essais, faits en présence du professeur Morse, donnèrent de 210 à 240 signaux distincts par minute : on en obtint même 270 dans une expérience.

Ce ne fut cependant qu'au mois de février suivant que la fabrication du câble fut commencée. La distance de Valentia (Irlande) à Trinity-bay (Terre-Neuve), points choisis pour l'atterrissement dans les deux mondes, étant de 1640 milles marins, on estima à 2500 milles anglais (2172 milles marins) la longueur de câble nécessaire pour parer à toutes les éventualités. La *Gutta-Percha C^ie* devait fabriquer l'âme formée d'une cordelette de sept fils de cuivre de 0,6 millimètre de diamètre chacun, recouverte de trois couches de gutta-percha ayant ensemble une épaisseur de 4 millimètres ; le poids du cuivre, par mille, devait être de 48 kilogrammes, celui de la gutta-percha, également par mille, de 120 kilogrammes.

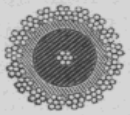


Fig. 13.

Le revêtement extérieur fut confié par moitiés à *MM. Glass Elliot et C^ie* et à *MM. Newall et C^ie*. Il comprenait un matelas de chanvre imprégné d'une composition de goudron de Norwège, de poix, d'huile de lin et de cire et dix-huit torons formés chacun de sept fils de fer de 0,7 millimètre de diamètre (fig. 13). Le câble était ensuite enduit d'une mixture de goudron, poix et huile de lin : son diamètre total était de 39 millimètres. Il pesait 1200 kilogrammes par mille marin dans l'air, et pouvait résister à une traction de 3 tonnes.

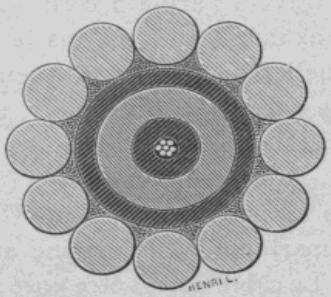


Fig. 14.

Aux abords des côtes, sur une longueur de 10 milles près de Valentia, et de 15 milles près de Trinity-Bay, l'armature extérieure était formée de douze fils de fer de 5 millimètres de diamètre (fig. 14), ce qui portait le poids du câble d'atterrissement à 8,1 tonnes par mille.

Le câble devait être livré au mois de juin 1857 et par conséquent entièrement terminé dans l'espace de quatre mois : pour se rendre compte de l'énormité de l'entreprise, il suffit de remarquer que, pour le conducteur en cuivre, on avait à se pourvoir de 116 tonnes de cuivre qui devaient être étirées en fils d'une longueur de 17500 milles, cordés ensemble ensuite sur une longueur de 2500 milles ; 250 tonnes de gutta-percha devaient être préparées et placées en trois couches distinctes sur le fil de cuivre. Enfin 1687 tonnes de fer au charbon de bois devaient donner 315000 milles de fils avec lesquels on devait fabriquer 45000 milles de cordelettes destinées à former le revêtement extérieur du câble.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette précipitation, qui résultait d'engagements regrettables pris par la compagnie vis-à-vis de ses actionnaires et du public, eut des conséquences fatales pour le succès de l'expédition. Les électriciens de la compagnie, malgré l'imperfection de leurs procédés de vérification, ne se faisaient cependant aucune illusion sur la valeur du câble au point de vue électrique. Plusieurs solutions de continuité du conducteur en cuivre, dues à de fausses soudures, avaient été observées, en cours de fabrication, sur des sections de câble déjà recouvertes de leur armature.

Pour éviter ce genre d'accidents si redoutable, on décida de soumettre l'âme du câble, avant de lui appliquer son revêtement en chanvre, à des épreuves de traction, toujours dangereuses, mais qui, faites avec des machines trop primitives, déterminèrent fréquemment un allongement permanent du cuivre : la gutta-percha, grâce à son élasticité, revenant au contraire sur elle-même, le conducteur se décentrait et, en certains points, venait affleurer le matelas de chanvre. Les cuves dans lesquelles était lové le câble, une fois recouvert de son armature en fer, ne pouvant contenir de l'eau, le câble resta en outre à sec dans des ateliers surchauffés. A Greenwich même, tandis que la température extérieure était exceptionnellement élevée, il demeura exposé au soleil pendant toute une journée et on vit la gutta-percha filtrer par gouttelettes à travers l'armature en fer. De nombreuses coupures furent d'ailleurs faites sans ménagement dans le câble : les soudures qu'elles nécessitèrent et auxquelles on ne donna aucun soin constituèrent de nouveaux points faibles. Le cuivre employé était, par surcroît, très impur.

Malgré ces conditions si défavorables et les protestations même de M. Whitehouse, le câble fut embarqué sur deux grands navires : le *Niagara*, de la marine des États-Unis, jaugeant 5000 tonneaux et l'*Agamemnon*, appartenant à la marine anglaise, 3200 tonneaux.

Le câble devait être posé sur un fond de 1700 brasses de profondeur moyenne que l'on croyait très régulier et qui semblait former une sorte de vaste plateau entre l'Irlande et Terre-Neuve, dont le séparaient deux tranchées assez profondes, ne dépassant pas cependant 2500 brasses. Ce plateau avait été reconnu précédemment par le commandant Maury, de la marine des États-Unis; de nouveaux sondages, faits spécialement en vue de la pose du câble atlantique, mais à des intervalles de 20 et même 30 milles les uns des autres, par l'*Arctic*, navire américain, et le *Cyclope*, navire anglais, ayant confirmé les idées du commandant Maury, la dénomination de *plateau télégraphique* ne tarda pas à être universellement acceptée. Ce terrain est recouvert d'une vase grise, molle et très fine, appelée *ooze*, et qui est éminemment favorable à la conservation des câbles; aussi reçut-il pendant longtemps tous les câbles qui furent successivement immergés entre l'Europe et l'Amérique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le 6 août 1857, les deux navires quittèrent Valentia, précédés du *Cyclope*, chargé d'indiquer la route, et accompagnés par deux corvettes, l'une anglaise l'autre américaine, le *Léopard* et la *Susquehanna*, et par deux petits vapeurs de rivière destinés à agir par les très petits fonds. La majeure partie du câble d'atterrissement avait été immergée la veille par l'un de ces petits bâtiments, le *Willing mind ;* l'épissure ayant été faite sur 3 milles de câble d'atterrissement qui restaient à bord du *Niagara*, le déroulement commença avec une vitesse de deux milles à l'heure.

Au bout de trois quarts d'heure, le câble sauta par-dessus l'une des poulies de la machinerie et se brisa : il fallut le reprendre dans une embarcation au rivage même et le suivre jusqu'au bout ; l'épissure sur le câble du *Niagara* fut faite dans la soirée du 7 et le déroulement reprit immédiatement après.

Le passage des fonds de 500 à 1700 brasses s'était effectué sans difficulté et l'opération se poursuivait avec régularité, lorsque, dans la journée du 11 août, la mer étant houleuse, les freins furent serrés inopportunément par un homme de manœuvre : un coup de tangage du navire brisa le câble à 20 brasses sous l'eau. La tension au dynamomètre n'était que de 1750 kilogrammes.

Fig. 15.

La profondeur de la mer, au point où se produisit l'accident, atteignait 2050 brasses. Le chemin déjà parcouru était de 274 milles et le câble dépensé de 334 milles marins.

La longueur de câble restant à bord du *Niagara* ne comprenant plus que 754 milles marins qui, joints aux 1088 milles de l'*Agamemnon*, formaient un total de 1847 milles, et cette longueur étant insuffisante pour la distance à parcourir (1640 milles) [1], les navires rentrèrent à Plymouth. Le câble fut débarqué et déposé à Keyham dans des bassins qu'on laissa à sec, dans la crainte de favoriser l'oxydation des fils de fer de l'armature. Les parties les plus défectueuses en furent coupées et une nouvelle longueur de 750 milles marins fut fabriquée dans les ateliers de MM. Glass Elliot et Cie, de manière à porter à 2600 milles marins l'approvisionnement total.

La machinerie pour le déroulement du câble fut aussi complètement modifiée. Les quatre roues sur lesquelles s'enroulait successivement le câble, en formant pour ainsi dire deux 8 renversés (fig. 15), furent démontées et remplacées par un système de freins dont une commission de la Société des ingénieurs civils avait indiqué le principe et que sir Ch. Bright fit construire.

[1] *Pose du câble transatlantique entre l'Irlande et Terre-Neuve*, par A. Delamarche, ingénieur hydrographe de la marine. Paris, 1858.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A bord de l'*Agamemnon*, ces freins se composaient (fig. 16) de deux grandes roues A et B placées dans le même plan vertical et portant chacune quatre rainures profondes : sur les axes de ces deux roues étaient montés, deux à deux, quatre grands tambours sur lesquels frottaient des sabots en bois, reliés entre eux par de fortes bandes en tôle qui en embrassaient presque toute la circonférence. L'une des extrémités de ces bandes était fixe ; l'autre était reliée à un jeu de leviers articulés N, munis de contrepoids, qu'on faisait mouvoir dans un sens ou un autre pour augmenter ou diminuer le frottement des sabots sur les tambours, et par suite pour ralentir ou accélérer leur vitesse de rotation. Deux roues montées sur les mêmes axes que les tambours et engrenant avec une troisième roue E solidarisaient le mouvement des roues A et B.

Le câble sortant des cuves était maintenu par la poulie L, passait ensuite successivement dans les rainures des roues A et B dont il n'embrassait que les arcs extérieurs et se rendait à la poulie F et de là au dynamomètre. Celui-ci se composait d'une poulie G fixée à une pièce O qui pouvait glisser entre deux montants verticaux : cette pièce O portait une tige que l'on pouvait charger de poids variables et qui se terminait par un piston plongeant dans un corps de pompe rempli d'eau, afin d'éviter les chocs résultant d'une variation brusque dans la tension du câble.

Le câble arrivant de la poulie F passait sous la roue mobile du dynamomètre, se rendait à une autre poulie placée à la même hauteur que la précédente et tombait à la mer. Le poids de l'équipage mobile G faisait fléchir d'autant plus le câble que la tension de celui-ci était moins considérable : une échelle tracée sur les montants de l'appareil et graduée préalablement pour diverses charges donnait immédiatement la valeur de la tension du câble à chaque instant.

Près du dynamomètre se trouvait une roue de gouvernail qui transmettait, par l'intermédiaire d'une chaîne, le mouvement à la roue R : celle-ci était en relation avec la poulie Q qui faisait mouvoir le levier articulé N et par suite la tige M des freins. L'agent chargé de manœuvrer ces appareils suivait ainsi facilement les indications du dynamomètre et, d'après l'observation de la tension, pouvait les serrer ou les desserrer, suivant les besoins, en tournant dans le sens convenable la roue du gouvernail.

Bien que constituant un progrès sérieux sur le passé, cette lourde machinerie, avec ses roues en fonte, ses engrenages, ses freins dont les sabots ne pouvaient être refroidis facilement, était encore bien imparfaite et on ne peut que s'étonner aujourd'hui qu'elle ait permis de mener à bonne fin une opération aussi délicate que l'immersion d'un câble dans de grandes profondeurs.

Le professeur W. Thomson avait, d'un autre côté, fait construire au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

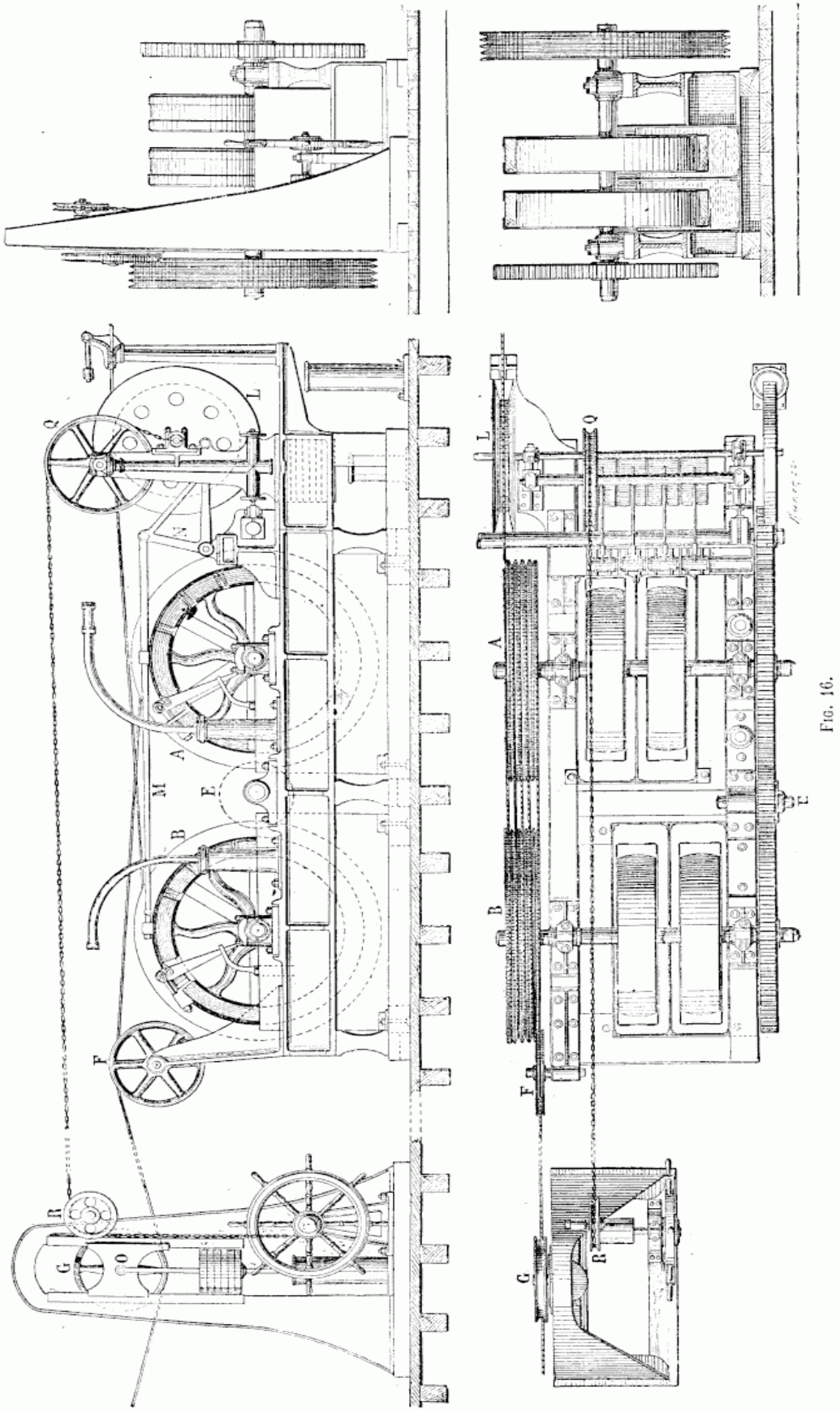


Fig. 16.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mois de mars ou d'avril 1858 ses premiers galvanomètres à miroir, instruments d'une exquise sensibilité et qu'il sut modifier de manière à les adapter soit aux essais à faire à bord ou à terre, soit à la transmission des signaux sur les longues lignes sous-marines.

Après quelques expériences préliminaires de déroulement et de relèvement faites au printemps de 1858 dans la baie de Biscaye, l'*Agamemnon* et le *Niagara* se rendirent au milieu de l'océan entre Terre-Neuve et Valentia, épissèrent l'un sur l'autre les deux bouts du câble qu'ils portaient et se séparèrent le 16 juin en immergeant chacun, l'*Agamemnon* vers Valentia, le *Niagara* vers Terre-Neuve. Trois fois le câble se rompit et l'opération dut être recommencée : on perdit ainsi environ 540 milles de câble. Après être rentrée à Queenstown, la flottille en repartit et pour la quatrième fois refit l'épissure au milieu de l'océan. Le déroulement enfin se continua sans incident notable et, le 5 août, la pose était heureusement terminée.

On avait constaté néanmoins, durant l'immersion, l'apparition successive de fautes graves et nombreuses dans l'isolement du câble : dès le début même de l'opération, les signaux avaient tout à coup complètement cessé de passer à travers le conducteur qui paraissait isolé. Au bout de deux heures les signaux reparurent aussi brusquement qu'ils avaient disparu précédemment et sans cause apparente. On attribua cette circonstance à une rupture du fil de cuivre due à la tension que supportait le câble pendant sa descente dans l'eau ; une fois arrivé au fond de la mer, la tension ayant cessé, les deux bouts du conducteur en cuivre devaient revenir au contact l'un de l'autre et rétablir ainsi la communication.

La longueur totale du câble immergé ayant été de 1910 milles marins, on en conclut que la perte ou différence entre la longueur du câble et le chemin parcouru était de 16 p. 100 environ.

Des dépêches de félicitations furent échangées entre la reine d'Angleterre et le président des États-Unis ; de bruyantes démonstrations de joie, se traduisant par des illuminations qui mirent le feu à l'hôtel de ville de New-York, des processions aux flambeaux, des salves d'artillerie se produisirent dans toute l'Amérique. L'Angleterre se préparait à célébrer, de son côté, la réalisation de ce rêve gigantesque de l'union entre les deux mondes, lorsque les signaux, qui n'avaient jamais été bien nets, devinrent de plus en plus confus : l'existence d'un nouveau défaut, d'une extrême gravité, fut constatée dans l'isolement du câble ; ce défaut paraissait devoir se trouver à 300 milles environ de Valentia. On put, pendant quelques jours encore, maintenir la communication, à l'aide des récepteurs à miroir que sir W. Thomson venait de faire construire ; mais, le 1er septembre 1858, les signaux devinrent inintelligibles et disparurent complètement le lendemain.

Les bobines d'induction de M. Whitehouse n'avaient servi à Valentia que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pendant quelques jours ; des piles avaient été employées ensuite comme générateurs d'électricité dans cette station : les récepteurs à miroir de sir W. Thomson y avaient été installés presque immédiatement après l'ouverture de la ligne. A Terre-Neuve, au contraire, on avait fait usage des machines magnéto-électriques et d'un relais : aussi la réception des signaux y avait toujours été plus difficile qu'à Valentia.

Pour des motifs qui sont restés inconnus, les appareils de transmission n'avaient été prêts à fonctionner à Terre-Neuve que le 10 août, de telle sorte que la communication avait effectivement duré vingt jours seulement; elle n'avait pas été livrée au public. Le gouvernement anglais avait pu toutefois contremander à temps le départ de deux régiments sur le point de s'embarquer au Canada pour rentrer en Angleterre et réaliser ainsi une économie de plus d'un million : cette circonstance mit en lumière les avantages que l'on devait retirer des communications télégraphiques entre les deux continents et ne contribua pas peu à faire surgir de nouveaux projets.

Des tentatives furent faites en 1860 pour réparer le câble, mais durent être bientôt abandonnées par suite du mauvais état de l'armature en fer ; les câbles d'atterrissement seuls furent relevés.

La cause déterminante de l'interruption de la communication ne put par suite être assignée avec précision, bien que, d'après ce que nous avons expliqué plus haut, il existât, dans le câble, un grand nombre de fautes qui devaient nécessairement, et à bref délai, amener la destruction de la ligne. On a blâmé aussi les électriciens d'avoir envoyé dans le câble, après son immersion, le courant de 480 éléments de pile et des courants électro-magnétiques d'une intensité analogue. La vitesse de transmission maxima obtenue correspondait à 120 signaux simples, par minute, avec des courants alternés, en comprenant par signaux simples une succession de points également espacés. Cette vitesse devait représenter environ 2 mots 3/4 ; mais, en fait, on atteignit à peine 1 mot de 5 lettres par minute, en moyenne, en se servant d'un relais ; avec le galvanomètre Thomson, on obtenait deux mots par minute. La transmission du télégramme du président Buchanan dura plus de trente heures.

Malgré l'insuccès final de l'entreprise, il restait néanmoins démontré expérimentalement, d'une part, qu'il était possible d'immerger un câble dans les profondeurs de l'Océan et, d'autre part, que des signaux réguliers et intelligibles pouvaient être transmis à travers l'énorme distance de 2,000 milles marins qui sépare l'Irlande de l'Amérique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CABLES DE LA MER ROUGE ET DES INDES

M. Lionel Gisborne, ayant obtenu du gouvernement ottoman, en 1857, l'autorisation d'établir une ligne télégraphique en Egypte et d'immerger un câble dans la mer Rouge, constitua une compagnie du *Télégraphe de la mer Rouge et des Indes*, qui se proposa de relier l'Angleterre à ses possessions indiennes. L'importance de cette ligne et les premiers échecs que venait de subir, dans cette même année, la Compagnie du Télégraphe atlantique, décidèrent au commencement de 1858, le gouvernement anglais à accorder à la nouvelle compagnie une garantie d'intérêts, comme il avait fait pour la Compagnie atlantique.

La ligne, dont les points extrêmes étaient Suez et Kurrachee (3043 milles marins), fut divisée en deux parties : la première, de Suez à Aden (1358 milles) avec atterrissements intermédiaires à Cossire et Suakim, fut posée en 1859. Les diverses sections de cette ligne se trouvèrent mises successivement hors de service. Celle de Suakim à Aden, qui avait été posée avec une tension trop forte, fut réparée une première fois en 1860 ; mais une interruption survint de nouveau quelques jours après. Une partie du câble relevé fut trouvée couverte de coquillages et d'herbes marines qui avaient préservé le fer de l'oxydation ; en beaucoup d'autres points, l'armature extérieure était complètement rongée par les roches sur lesquelles le câble avait reposé.

La deuxième partie de la ligne, d'Aden à Kurrachee (1685 milles), avec atterrissements intermédiaires à Hallain et à Mascate, fut immergée en 1860 : en certains points, on atteignit des fonds de 2000 brasses. Des fautes se déclarèrent très promptement sur ces trois sections : la compagnie n'ayant ni le personnel spécial, ni les moyens matériels nécessaires pour faire exécuter les travaux de réparation, les câbles durent être abandonnés sans avoir, pour ainsi dire, rendu aucun service

Le câble fabriqué par MM. Newall et C^ie^ était formé d'une cordelette de sept fils de cuivre pesant 82 kilogrammes par mille marin, recouverte de deux couches de gutta-percha alternant avec deux couches de composition Chatterton, mélange plus plastique que la gutta-percha et destiné à produire une adhérence plus intime de la gutta avec le cuivre et des diverses couches de gutta entre elles. Le poids total du diélectrique était de 96 kilogrammes par mille. L'âme était enveloppée de chanvre goudronné et de dix-huit fils de fer de 2 millimètres de diamètre : aux abords des côtes, l'armature extérieure était composée de neuf fils de fer de 5,5 millimètres.

La vitesse de transmission entre Aden et Hallain, la plus longue section de la ligne (718 milles), était de cinq mots par minute.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

COMMISSION CHARGÉE D'ÉTUDIER LES CONDITIONS DE FABRICATION, D'IMMERSION ET DE RÉPARATION DES CABLES SOUS-MARINS

Emu par les échecs successifs de la Compagnie Atlantique et de celle de la mer Rouge et des Indes, dont les pertes représentaient plus de trente millions de francs et à qui il avait donné une garantie d'intérêts, le gouvernement anglais résolut, en 1859, avant d'engager davantage sa responsabilité, de s'éclairer sur l'avenir qui pouvait être réservé à la télégraphie sous-marine.

Une Commission de huit membres nommés, moitié par le *Board of Trade*, moitié par la *Compagnie du Télégraphe atlantique* [1], fut chargée de faire une enquête sur la « meilleure manière de construire, poser et maintenir les câbles télégraphiques sous-marins ».

Cette commission, présidée par le capitaine Douglas Galton, consacra vingt-deux séances, du 1er décembre 1859 au 4 septembre 1860, à interroger les ingénieurs, professeurs, physiciens, marins et constructeurs qui avaient pris part jusqu'alors, à des titres divers, à des travaux de télégraphie sous-marine et dont l'expérience ou les connaissances pouvaient l'éclairer. Elle fit porter ses investigations sur la composition de tous les câbles fabriqués antérieurement ou en cours de fabrication à ce moment, sur la qualité des divers matériaux employés, les circonstances particulières qui s'étaient produites durant la fabrication de tous ces câbles, et celles qui se rapportaient à leur immersion, sur la route suivie, les essais électriques auxquels les câbles avaient été soumis aussi bien pendant la fabrication que pendant la pose, les appareils et la vitesse de transmission des signaux, etc. Des expériences furent entreprises, sous sa direction, pour étudier : 1° l'influence de la température et de la pression sur les matières isolantes entrant dans la composition des câbles ; 2° l'allongement et la résistance à la rupture des fils de cuivre, de fer et d'acier et du chanvre goudronné, séparés ou réunis. D'éminents savants, tels que MM. Wheatstone, Latimer Clark, Matthiessen, Allen Miller, Dr Werner et William Siemens, Fleeming Jenkin, etc., étudiaient de leur côté et faisaient connaître à la Commission les propriétés électriques du cuivre pur ou allié à d'autres métaux, ainsi que celles de la gutta-percha, la perméabilité à l'eau des différentes substances employées comme isolants, les causes chimiques de leur altération, les phénomènes

[1] MM. Robert Stephenson Douglas Galton, Wheatstone, W. Fairbairn et Geo. Bidder représentaient le *Board of Trade* et MM. Edwin Clark, Cromwell F. Varley, Latimer Clark et Geo. Saward, la *Compagnie atlantique*. M. Stephenson mourut peu de temps après le commencement des travaux de la Commission.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électriques de charge, de décharge et d'induction dans les câbles, des méthodes nouvelles d'essais pour la vérification des conditions électriques des conducteurs sous-marins et la recherche des défauts, la théorie de l'immersion des câbles, etc.

La Commission déposa son rapport au mois d'avril 1861. Elle y déclara en terminant qu'à son avis, les échecs qu'avaient éprouvés les lignes sous-marines soumises à son examen étaient dus à des causes qu'on eût pu éviter, si la question avait été suffisamment étudiée.

Elle était convaincue, en outre, que si la spécification, la fabrication, l'immersion et l'entretien des câbles sous-marins étaient faits suivant les principes qu'elle posait, les entreprises de ce genre pouvaient devenir aussi heureuses qu'elles avaient été malheureuses jusque-là.

Les événements ont justifié les prévisions de la Commission, et les principes fondamentaux qu'elle a posés font encore loi aujourd'hui dans la télégraphie sous-marine.

Ce rapport a été imprimé par ordre du gouvernement anglais avec les procès-verbaux des séances, les comptes rendus des expériences provoquées par la Commission, ainsi que les notes, rapports et dessins remis par les ingénieurs consultés ; l'ensemble de ces documents forme un in-folio très connu des spécialistes sous le nom de *blue-book*, véritable monument élevé à l'honneur de cette Commission, dont l'œuvre sera toujours considérée comme un modèle d'investigation scientifique.

Dans cette même année 1861, l'*Association britannique pour l'avancement des sciences* chargeait une Commission, composée de MM. Williamson, Wheatstone, sir W. Thomson, Miller, Matthiessen et F. Jenkin, auxquels furent adjoints plus tard sir Ch. Bright et MM. Maxwell, W. Siemens, Balfour Stewart, C. F. Varley, Foster, Latimer Clark, Forbes, Ch. Hockin et le Dr Joule, de déterminer un système rationnel d'unités des différentes grandeurs électriques et de reproduire des étalons matériels de ces diverses unités.

Les travaux de cette Commission durèrent huit ans et ne furent entièrement terminés que dans le courant de l'année 1869. Le système d'unités électro-magnétiques absolues dont l'ohm, l'ampère, le farad, le volt et le coulomb sont des unités dérivées est son œuvre, qui a été consacrée, à Paris en 1881, par une Commission internationale dans laquelle étaient représentées toutes les nations civilisées. La construction de ces étalons, en substituant aux unités arbitraires répandues alors en grand nombre parmi les électriciens des grandeurs parfaitement définies, toujours identiques à elles-mêmes, a permis de donner à toutes les questions de mesures électriques une netteté et une précision inconnues jusque-là, et a ainsi rendu à l'industrie de l'électricité et à la science elle-même un immense service.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CABLE DE MALTE A ALEXANDRIE

Fabriqué pour le compte du gouvernement anglais qui avait projeté, en 1859, de l'immerger entre Falmouth et Gibraltar où l'on rencontre des fonds de 2500 brasses, ce câble avait dû être posé ensuite entre Rangoon et Singapore où les fonds n'atteignent pas 100 brasses : la guerre de Chine ayant pris fin avant qu'il ne fût prêt à être immergé, sa destination fut changée une troisième fois, et il servit définitivement à constituer une communication indépendante avec l'Egypte, l'une des escales de la route des Indes. L'âme, calculée pour transmettre au moins cinq mots par minute, dans un circuit de 1200 milles, était formée d'un toron de sept fils de cuivre pesant 180 kilogrammes par mille marin, et de trois couches de gutta-percha pesant également 180 kilogrammes par mille et alternant avec de la composition Chatterton. L'âme seule se trouvant fabriquée au moment du premier changement de destination de ce câble, les fils d'acier, entourés de chanvre, qui devaient constituer son armature extérieure, furent remplacés par dix-huit fils de fer de 3 millimètres de diamètre. Des soins particuliers avaient été apportés à la fabrication de ce câble : le gouvernement anglais avait choisi comme électriciens MM. Siemens, Halske et C^ie^, qui imaginèrent un système complet et rationnel d'essais électriques des câbles durant leur fabrication et leur immersion, construisirent des instruments d'une extrême délicatesse pour effectuer ces essais et, enfin, introduisirent un étalon de résistance électrique, qui resta presque universellement en usage parmi les électriciens jusqu'au moment où parut la nouvelle unité déterminée par le Comité de l'Association britannique, l'*Ohm*. Les glaînes d'âmes ne furent essayées qu'après vingt-quatre heures d'immersion dans de l'eau chauffée à 24 degrés centigrades : elles furent soumises, en outre, à des épreuves de vide et de pression destinées à faire éclater les bulles d'air qui pouvaient être restées dans le diélectrique. La gutta-percha ayant été trouvée un jour percée accidentellement, on remarqua que, sous l'action de la pression, l'eau s'était frayé un chemin le long du toron de cuivre. Pour obvier à cet inconvénient, M. W. Smith imagina d'enduire le conducteur central de la cordelette de cuivre, de composition Chatterton, avant de former le toron, de manière à en boucher tous les interstices et empêcher les bulles d'air d'y rester enfermées.

L'âme avait été fabriquée par la *Compagnie de la Gutta-percha ;* le revêtement extérieur fut fait dans les ateliers de MM. Glass, Elliot et C^ie^. Par suite de craintes mal fondées, on avait évité d'installer sur les bâtiments qui devaient recevoir le câble des cuves étanches : le câble ne put consé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quemment être conservé sous l'eau à bord. Il en résulta qu'il se trouva soumis à des alternatives d'humidité et de sécheresse qui facilitèrent l'oxydation rapide de l'armature en fer. Cette énorme masse métallique se trouvant renfermée dans un très petit espace, dégagea une quantité de chaleur telle que la température y dépassa de plus de 14 degrés centigrades la température de l'air extérieur ; il fallut constamment arroser le câble et pomper ensuite l'eau d'arrosage.

Ce câble a été immergé, en 1861, en trois sections : Malte-Tripoli, Tripoli-Benghazi et Benghazi-Alexandrie, dont la longueur totale est de 1331 milles. Sur la deuxième section, comprenant 308 milles, on put transmettre dix mots par minute. Des interruptions nombreuses se produisirent successivement sur chacune des trois sections ; mais comme toute la ligne reposait sur des fonds de 120 brasses à peine, il a toujours été facile de réparer les avaries.

Ce câble a été remplacé, en 1868, par une ligne directe de Malte à Alexandrie.

CABLES DE TOULON A ALGER ET D'ALGER A PORT-VENDRES

Une première concession accordée par le gouvernement français, en 1859, pour l'établissement d'une ligne sous-marine directe entre la France et l'Algérie étant restée sans effet, faute de fonds, MM. Glass, Elliot et C^ie^ s'engagèrent, au mois d'avril 1860, à reprendre l'entreprise qui devait être terminée le 31 août de la même année. Le câble, fabriqué à peu près à la même époque que celui de Falmouth à Gibraltar, et dans des conditions analogues, se composa :

1° D'un toron de sept fils de cuivre, ayant ensemble un diamètre de 2 millimètres et pesant 50 kilogrammes par mille marin ;

2° De quatre couches de gutta-percha, alternant avec autant de couches de composition Chatterton ; la matière isolante pesait 52 kilogrammes par mille, et le diamètre de l'âme était de 9,25 millimètres ;

3° D'un revêtement de filin goudronné ;

4° D'une armature extérieure formée de dix fils d'acier de 2 millimètres de diamètre, entourés chacun séparément de filin goudronné, pour en prévenir la corrosion après l'immersion.

Aux abords des côtes, l'armature extérieure devait comprendre dix-huit fils de fer nus et jointifs, assez gros pour donner au câble un poids de 2300 kilogrammes par mille sur les fonds de 66 à 110 brasses, de 4600 kilo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

grammes sur les fonds de 44 à 66 brasses et de 9200 kilogrammes sur les fonds inférieurs à 44 brasses.

Le poids du câble de grands fonds était dans l'air de 1148 kilogrammes par mille et de 572 kilogrammes dans l'eau; sa résistance à la rupture était de six tonnes.

Le câble fut soumis, durant sa fabrication, à des essais électriques qui, pour l'âme, eurent lieu sous l'eau à une température uniforme de 24° C. : la résistance du conducteur était les 3/4 environ de celle d'un fil de fer de 4 millimètres de diamètre et de même longueur; celle de l'enveloppe isolante, par mille marin, était d'environ dix-huit millions de kilomètres de fil de fer de 4 millimètres de diamètre.

Le câble fut embarqué à bord du *William Cory*, qui arriva à Alger le 9 septembre 1860. Les points d'atterrissement choisis étaient la baie de la Salpêtrière, près d'Alger, et l'anse des Sablettes, près de Toulon; la ligne devait, en outre, passer sur les hauts fonds de l'île de Minorque qui se trouve presque dans l'alignement des deux points extrêmes.

L'immersion, commencée à partir de la côte d'Afrique, le 10 septembre, se poursuivit d'abord avec régularité, mais le lendemain se produisit une coque suivie bientôt d'une perte complète du courant électrique à la terre. Bien que l'on fût au-dessus des fonds de 1300 à 1400 brasses, on put retirer de la mer environ trois milles de câble qu'on avait laissé filer depuis l'interruption et atteindre la coque. La partie défectueuse fut supprimée et le bout du câble, venant de la mer, épissé sur le câble en bon état lové à bord. Le déroulement recommença et se continua sans incident jusqu'au 14 au soir, lorsqu'on n'était plus qu'à 45 milles du cap Sicié. A ce moment, le temps, qui jusque-là s'était maintenu au beau, changea brusquement; les hommes chargés du déroulement du câble dans la cuve ne purent se maintenir en place; une nouvelle coque put se former et le câble se rompit au mouvement de tangage du navire, par une profondeur de 1300 brasses qui ne laissait aucun espoir de pouvoir le draguer.

Les îles Baléares venant d'être rattachées à l'Espagne par une ligne sous-marine, on songea à en profiter pour constituer, avec la section de câble comprise entre Minorque et Alger, une communication avec l'Algérie. Le câble fut dragué sur un fond de 70 brasses et les deux bouts conduits à terre, près de Mahon, avec du câble de mer profonde qui dut être remplacé au bout de quelques mois. Les télégrammes purent ainsi être échangés avec l'Algérie par la voie Barcelone-Mahon, en attendant l'achèvement de la ligne directe.

Le *William Cory* revint à Toulon le 14 novembre 1860 avec une nouvelle provision de câble, et repartit des Sablettes pour immerger la section de Toulon à Mahon qui devait être raccordée ensuite à la section Mahon-Alger,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au large de l'île de Minorque. Mais, à 90 milles de terre, il fut abordé accidentellement par le *Gomer*, bâtiment de l'État qui avait été chargé de l'escorter : le câble dut être coupé et placé sur une bouée, pour permettre au navire de réparer ses avaries dans le port de Toulon.

Le *William Cory* ne put reprendre ses opérations que le 13 janvier 1861. La bouée ayant été retrouvée sans difficulté, le filin qui la reliait au câble fut relevé ; mais, au passage de la chaîne sur le tambour, celle-ci se rompit et le câble retomba à la mer. Le dragage paraissant impossible sur des fonds de 1200 à 1300 brasses, on abandonna l'opération.

Un autre bâtiment de la Compagnie, le *Brunswick*, arrivé pour immerger un câble entre Toulon et la Corse, fut chargé d'entreprendre le relèvement des deux sections du câble restées sans emploi entre Mahon et Toulon. Il ne put en relever que 8 milles à partir des Sablettes, et 20 à partir de Mahon ; le câble se brisa dans les deux cas sur de grandes profondeurs d'eau.

Une nouvelle convention fut passée avec MM. Glass, Elliot et C^ie^ pour compléter la ligne directe à l'établissement de laquelle le gouvernement français attachait une grande importance. On résolut, cette fois, de faire partir le câble de Port-Vendres qui, étant plus rapproché de Minorque que Toulon, permettait de suivre une route sur laquelle on devait rencontrer des fonds moindres. L'opération commencée par le *Brunswick*, le 31 août 1861, était entièrement terminée le 19 septembre suivant. Une quinzaine de milles avaient dû être relevés, en cours de pose, pour éliminer un défaut qui s'était déclaré ; d'autres pertes encore étaient survenues, mais la seule condition exigée pour la réception du câble étant la transmission, dans les deux sens, d'une dépêche de vingt mots à quinze jours d'intervalle, on avait passé outre. La longueur du cable immergé entre Port-Vendres et Minorque était de 226 milles, et celle du câble immergé l'année précédente, entre Minorque et Alger, de 230 milles. Les transmissions s'échangèrent sur la ligne entière à l'aide de relais Siemens, avec des courants alternés de dix éléments Daniell. La vitesse de transmission moyenne était de huit à dix mots par minute et de treize mots en essais.

Ce câble fut interrompu entre Minorque et Alger à la suite d'une violente tempête, le 25 septembre 1862. Quelques tentatives furent faites avec des moyens insuffisants pour le relever et durent bientôt être abandonnées.

CABLE D'ORAN A CARTHAGÈNE

Malgré les échecs qu'elle avait éprouvés sur les lignes de Corse et d'Algérie, l'Administration française persista dans l'idée de relier par une ligne sous-marine sa grande colonie africaine à la métropole. Pour diminuer la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dépense, elle renonça toutefois aux avantages d'une communication directe indépendante, et se décida à faire atterrir le câble dans la partie méridionale de l'Espagne. Après des sondages faits dans ces parages, au mois de juillet 1863, Oran, en Algérie, et Carthagène, en Espagne, furent choisis comme points terminus du nouveau câble : la distance qui sépare ces deux villes est d'environ 113 milles marins. Les fonds s'abaissent rapidement des deux côtés jusqu'à 1000 brasses environ et se maintiennent ensuite sans variations brusques ; le maximum de la profondeur rencontrée sur le tracé adopté était de 1400 brasses environ. Dans les grandes profondeurs, on trouve une vase molle très favorable à la conservation du câble.

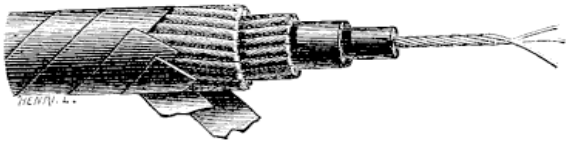


Fig. 17.

L'Administration traita avec MM. Siemens et Halske pour la fabrication et la pose, entre ces deux points, d'un câble dont le type tout nouveau avait été exposé à Londres, en 1862, par MM. Siemens frères. L'âme se composait (fig. 17) d'un toron de trois fils de cuivre recouvert de deux couches de gutta-percha, portant le diamètre total de l'âme à 7 millimètres ; celle-ci était entourée d'abord de deux couches de fortes cordelettes de chanvre blanc, enroulées en hélices de sens inverse et à très longs pas, presque parallèlement à l'axe du câble, et enfin d'une bande de cuivre suffisamment flexible dont les spires se recouvraient à la manière des écailles d'un poisson. On avait pris, pour former cette cuirasse, du cuivre phosphoreux qui n'est pas sujet à être attaqué par l'eau de mer. Le diamètre total du câble était de 11 millimètres ; dans les faibles profondeurs, l'enveloppe de chanvre était renforcée de manière à porter le diamètre du câble à 13 millimètres ; aux abords des côtes, le ruban de cuivre était remplacé par une armature ordinaire en fils de fer.

Le câble fut embarqué sur le *Dix-Décembre*[1] (fig. 18), petit navire à vapeur que l'Administration française avait acheté l'année précédente et fait aménager en Angleterre pour les travaux de télégraphie sous-marine. La machinerie de pont de ce navire (fig. 19) se compose d'un grand tambour A monté sur un axe qui porte deux roues à freins B : chacune de ces roues est enveloppée par une série de sabots en bois reliés entre eux par une bande de fer que l'on peut serrer ou desserrer à la main, à l'aide d'une double vis à filets contraires C. Ces bandes sont soutenues, à leur partie inférieure, par une tige D articulée sur une potence et, à leur partie supérieure, par un fort ressort à boudin E fixé à une seconde potence : ce res-

[1] Ce navire, qui est encore aujourd'hui affecté à la réparation des câbles français du littoral de l'Océan et de la Manche, a reçu, depuis 1870, le nom d'*Ampère*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

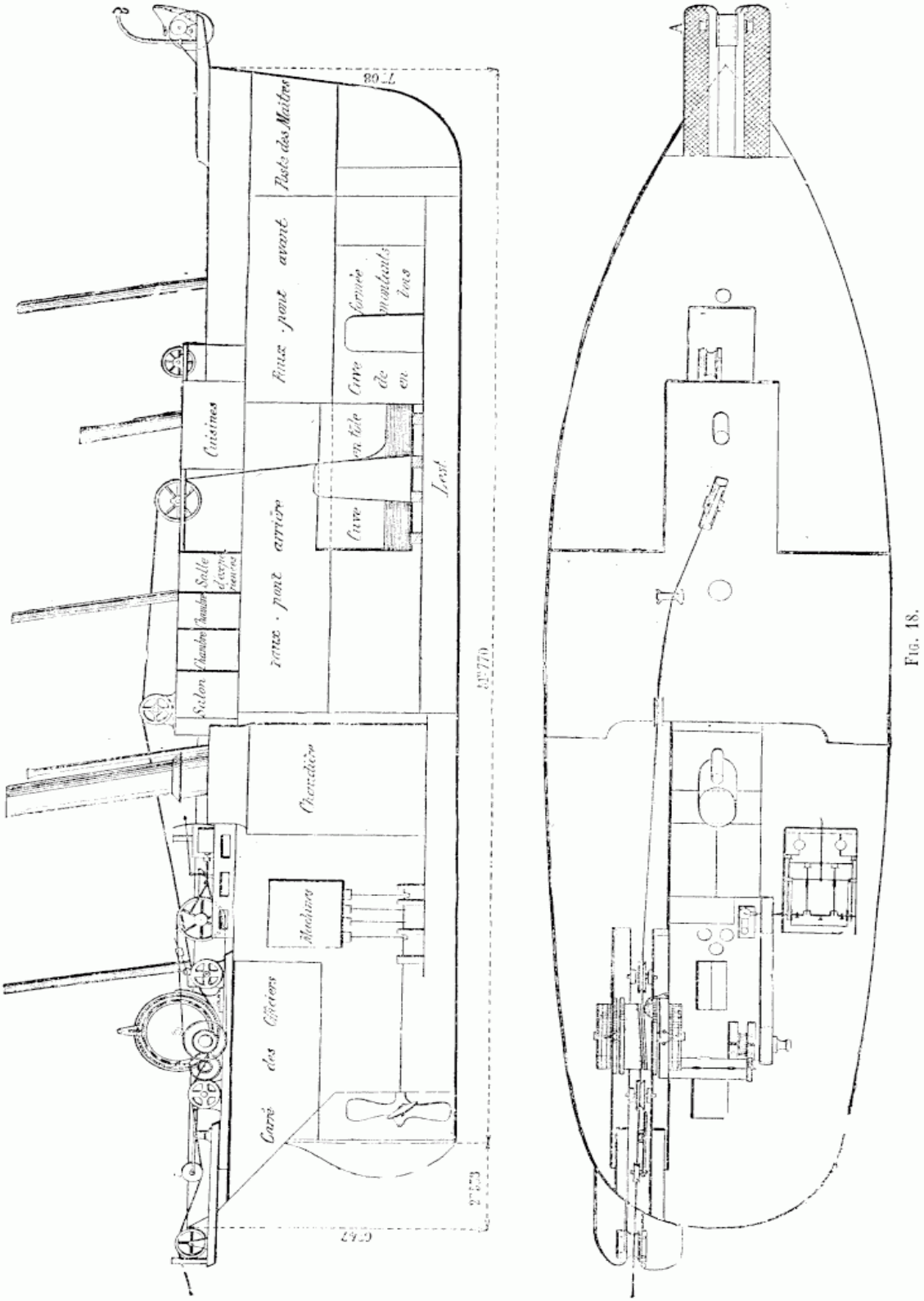


Fig. 18.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sort est destiné à supporter la bande de fer et les sabots lorsque le frein est desserré, de telle sorte que le tambour puisse tourner avec la plus entière liberté.

En avant du tambour se trouve une poulie à gorge F, surmontée d'une poulie jockey G avec contrepoids mobile H. Le câble arrive des cuves placées à l'avant du navire, guidé par des rouleaux et poulies convenablement dis-

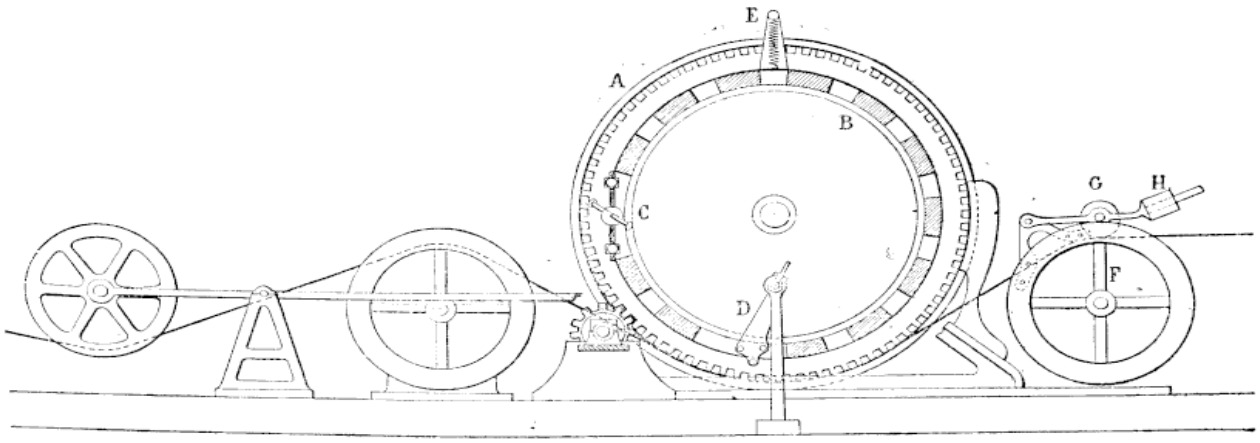


Fig. 19.

posés et passe dans l'intervalle resté libre entre la poulie à gorge et son jockey : on règle le contrepoids de telle sorte que le câble soit suffisamment tendu en arrivant sur le tambour et que les différents tours ne puissent chevaucher les uns sur les autres. Un couteau qui affleure la partie antérieure du tambour repousse constamment les tours de câble, du rebord extérieur de ce tambour vers le milieu de son épaisseur, de manière à faire place au brin qui arrive de la cuve.

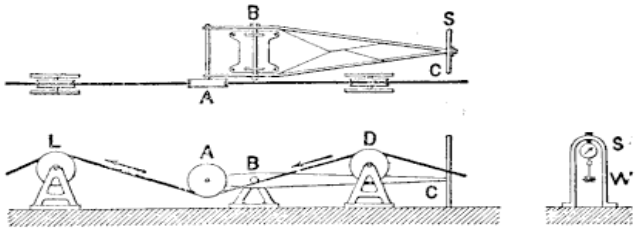


Fig. 20.

A la suite de cet appareil vient un dynamomètre (fig. 20) d'une forme particulière dont l'idée appartient à sir Ch. Bright et que M. F.-C. Webb a réalisée le premier à bord de la *Narva*. Il se compose d'une poulie à gorge A mobile autour d'un axe soutenu par un cadre, lequel peut lui-même tourner autour de l'axe B. L'extrémité C de ce

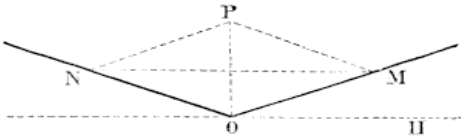


Fig. 21.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cadre est reliée par un jeu de leviers à une balance de Salter S suspendue à un bâti W. L'axe autour duquel tourne le cadre est placé de telle sorte que l'appareil soit naturellement en équilibre dans le plan horizontal et que la distance B C soit quintuple de celle A B.

De part et d'autre de la poulie A, à des distances et à des hauteurs égales, se trouvent deux poulies à gorge D et L : le câble passe sur ces poulies et sous celle du dynamomètre. Les positions des poulies D et L sont déterminées de telle sorte que la ligne du câble forme avec l'horizon un angle dont le sinus est 1/4, soit environ 14° 31′. En composant, suivant la règle du parallélogramme des forces (fig. 21), les deux tensions O M et O N, égales et contraires du câble au point O, la grandeur O P de la résultante est déterminée par la relation

$$\frac{O\,P}{2} = O\,M \times \sin M\,O\,H = O\,M \times \frac{1}{4} \qquad O\,P = \frac{1}{2}\,O\,M$$

La force verticale qui tend à soulever la poulie du dynamomètre est donc exactement la moitié de la tension du câble à chaque instant. Le rapport des bras de levier A B et B C étant 1 : 5, la force qui, dans la balance de Salter, fait équilibre à la poussée exercée sur la poulie A n'est que le 1/5 de cette poussée et par suite le 1/10 seulement de la tension du câble.

La poulie L surplombe l'arrière du navire et est munie de deux joues latérales destinées à éviter le frottement du câble contre des arêtes vives, lorsque accidentellement la direction de celui-ci n'est pas parallèle à l'axe du navire.

Une autre roue semblable, fixée sur une petite plate-forme, se trouve au-dessus de l'étrave du bateau, et est destinée aux relevages. Le câble, conduit par des poulies mobiles que l'on suspend aux haubans des mâts, arrive au tambour sur lequel il s'enroule trois fois et de là se rend dans l'une ou l'autre cuve, en suivant le chemin inverse de celui parcouru par le câble qui sort des cuves pour être immergé. On fait engrener, à l'aide d'une fourchette d'embrayage, une grande roue dentée fixée sur l'arbre du tambour avec une autre roue dentée que commande une petite machine à vapeur placée sur le pont : l'appareil d'immersion se trouve ainsi transformé en une sorte de grand treuil à vapeur. Le tirage entre le tambour et les cuves se fait à bras d'hommes.

On débraie la machine à vapeur dans les immersions ; son rôle se borne alors à actionner une pompe qui lance un jet d'eau continu sur le câble et sur les freins.

Afin d'éviter la formation possible de coques et les inconvénients résultant du passage rapide des grandes boucles de câble aux petites dans les cuves, M. Siemens avait enroulé son câble sur un grand tambour, à axe vertical,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

terminé par deux plateaux. Sous le plateau inférieur était placé un rail circulaire roulant sur des galets en fonte que supportait un autre rail circulaire de même diamètre. L'axe vertical du tambour portait à sa partie supérieure une roue dentée qui, par l'intermédiaire d'un système d'engrenages et de poulies, était commandée par la petite machine à vapeur placée sur le pont.

La pose commença le 12 janvier 1864 : au bout de quelques heures de marche, à la suite d'un arrêt occasionné par un dérangement de la grande bobine, le câble se brisa. L'énorme poids de la bobine avait promptement usé les galets qui s'écaillaient par places et opposaient à la rotation de tout le système une résistance considérable. M. Siemens renonça à ce mode de déroulement et le câble fut lové dans une cuve.

Le 28 janvier, on recommença l'opération en marchant d'abord très lentement : on augmenta ensuite peu à peu la vitesse qui atteignit jusqu'à 6 nœuds et même davantage. Au bout de douze heures, le câble se brisa dans les grandes profondeurs et fut abandonné. Le dynamomètre accusait, au moment de l'accident, une tension de 300 kilogrammes.

Une nouvelle tentative eut lieu au mois de septembre suivant. Tout le câble de grands fonds avait été heureusement déroulé ; mais une rupture se produisit à 10 milles au large de Carthagène, durant l'immersion du câble d'atterrissement. Il semble qu'en vue d'éviter une dépense trop considérable, le câble ait été posé avec trop peu de mou en approchant des côtes d'Espagne, aux points où les fonds se relèvent très brusquement ; une partie assez considérable de câble a dû être suspendue, en portant sans doute sur des arêtes de rochers, ce qui en a déterminé la rupture presque instantanée. On retira quelques milles de câble sans arriver jusqu'à la cassure, le câble s'étant brisé encore sur des fonds de 900 brasses. On renonça à l'opération après une vingtaine de jours passés à le draguer inutilement.

CABLE DU GOLFE PERSIQUE

Les câbles abandonnés de la mer Rouge n'ayant pu être réparés, malgré les efforts faits par une Compagnie qui s'était constituée en vue de les exploiter, le gouvernement des Indes britanniques se décida, en 1863, à entreprendre lui-même l'établissement d'une communication télégraphique avec l'Europe. Toutefois, afin d'abréger autant que possible le parcours sous-marin et d'éviter les grandes profondeurs, il fut décidé qu'on se bornerait à immerger un câble dans le golfe Persique, en longeant les côtes du Béloutchistan, de manière à soustraire les communications au vandalisme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des populations barbares, encore insoumises, de ce pays. Les points d'atterrissement choisis furent Kurrachee, sur la frontière de l'Inde et du Mekran, et Fao, à l'embouchure du Schot-el-Arab, formé de la réunion du Tigre et de l'Euphrate. La ligne, d'une longueur totale de 1150 milles, devait être divisée en quatre sections dont les stations intermédiaires devaient être Gwadur, Mussendom et Bushire. Une ligne terrestre passant par Bassorah, Bagdad, Mossoul et Diarbekir devait amener les dépêches de Fao à Constantinople, d'où elles pourraient, soit transiter sur le réseau continental européen, soit gagner le câble d'Alexandrie à Malte, à l'aide d'une ligne aérienne qu'une Compagnie se proposait de construire à travers l'Asie mineure.

Le modèle de câble, arrêté par sir Ch. Bright et M. Latimer Clark, et fabriqué dans les usines de M. Henley, offrit quelques caractères particuliers qui le distinguèrent de tous ceux qui l'avaient précédé. Dans le but de combiner les avantages que présente, pour le maintien de la continuité du conducteur, une cordelette à plusieurs brins avec ceux qu'offre, au point de vue de l'induction électrostatique, un fil plein unique, on forma le conducteur de quatre fils de cuivre *segmentaires*, c'est-à-dire disposés de manière à correspondre aux quatre quarts d'un cylindre coupé suivant deux plans diamétraux rectangulaires ; ces quatre fils étaient étirés à travers un tube en cuivre. Mais les difficultés de fabrication de ce conducteur furent telles qu'on dut l'abandonner et revenir au fil plein à section circulaire de même diamètre (3,2 millimètres) avant l'achèvement du travail. Ce fil était recouvert, par la *Compagnie de la Gutta-percha,* de quatre couches de gutta-percha alternant avec quatre couches de composition Chatterton, puis essayé par sections de trois milles marins dans de l'eau maintenue à la température de 24° C., et sous une pression de 3,5 kilogrammes par centimètre carré. La méthode dite d'accumulation fut appliquée pour la première fois aux essais des soudures. Au chanvre goudronné qui pouvait masquer les défauts d'isolement, M. W. Smith substitua une garniture humide et conductrice de chanvre tanné. L'armature extérieure comprenait douze fils de fer galvanisé de 6 millimètres de diamètre : pour préserver ces fils de l'oxydation et prévenir les accidents si fréquents produits par le rebroussement des fils cassés, à leur passage dans la machinerie de pose, l'armature en fer fut recouverte de deux couches de fils de chanvre enroulées en sens inverse ; chaque couche de chanvre était en outre imprégnée d'une composition bitumineuse due à MM. Bright et Clark, que l'on appliquait à chaud et à l'état liquide et qui était formée de goudron de Norwège, de poix et de silice en poudre : le câble était passé ensuite entre deux rouleaux à gorge qui en égalisaient et en polissaient la surface. Pour empêcher l'adhérence entre elles des couches de câble dans les cuves, on les saupoudrait de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaux. Aux autres avantages que présentait cette enveloppe extérieure, s'en joignit un sur lequel on n'avait pas compté : une plus grande flexibilité, d'où résulta un lovage plus parfait dans les cuves et conséquemment plus de chances pour le succès de l'immersion.

L'armature en fer du câble d'atterrissement devait être renforcée de manière à porter le poids de ce câble à huit tonnes par mille.

Le câble entièrement terminé fut déposé dans de vastes bassins remplis d'eau et soumis à des essais multipliés portant à la fois sur sa conductibilité, son isolement et sa capacité électrostatique. Il fut enfin embarqué sur un navire, transporté aux Indes, et immergé avec succès, mais non sans difficultés. A Khor-abd-Allah, à l'embouchure du Schot, notamment, la flottille avait mouillé sur un bas-fond séparé du rivage par un banc de vase de 6 à 8 milles de largeur. Le câble ne pouvant être porté à terre que par un bateau plat, on mit en réquisition la *Comète*, petit bateau de la marine de Bombay qui faisait le service entre Bassorah et Bombay et qui dut débarquer ses canons et son charbon pour faire place au câble. Cette opération ne demanda pas moins de quinze jours de travail. Dans le Schot, la vase du fleuve était si molle, qu'on ne pouvait y marcher : il fallut faire porter le câble par des hommes qui se traînaient sur le sol. Quand on atteignit la partie solide du banc qui sépare Khor-abd-Allah de Fao, on fut obligé de couper le câble par morceaux d'un mille et demi de longueur et de le transporter à dos d'hommes : plusieurs centaines d'Arabes furent employés à ce travail.

Cet atterrissement si difficile à mettre en place n'était pas encore terminé, qu'on constatait un isolement sur la section de Fao à Bushire : mais le câble ayant été posé sur des fonds ne dépassant pas 50 brasses, la réparation en fut opérée rapidement. Aucune des sections de la ligne n'eut, après l'immersion, un isolement inférieur à trois cents millions d'unités Siemens par mille et la résistance du conducteur ne fut nulle part supérieure à sept unités, également par mille marin. Ces résultats si satisfaisants furent certainement dus aux soins minutieux et multipliés qui avaient présidé à la fabrication et à la pose de ce câble.

CABLES ATLANTIQUES DE 1865 ET 1866

Les promoteurs du télégraphe atlantique, en tête desquels se trouvait M. Cyrus W. Field, n'avaient cependant pas, depuis leur échec en 1858, renoncé un instant à l'idée de réaliser leur conception gigantesque. La Compagnie du Télégraphe atlantique, en même temps qu'elle se préoccupait de réunir de nouveaux capitaux, avait obtenu du gouvernement anglais l'envoi,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans l'Océan Atlantique, de deux navires chargés d'explorer le fond de la mer jusqu'à une distance de trois cents milles, à partir des côtes d'Irlande et de Terre-Neuve. La campagne faite dans ce but en 1862, par le *Porcupine*,

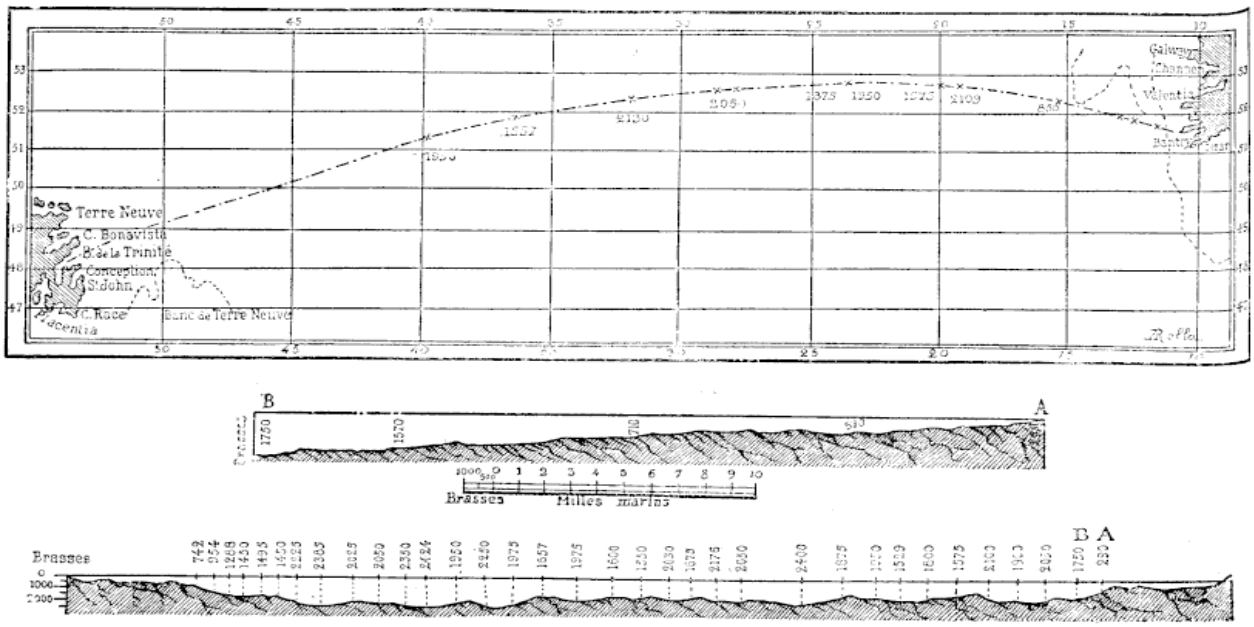


Fig. 22. — L'échelle des longueurs = 1/5 de celle des profondeurs.

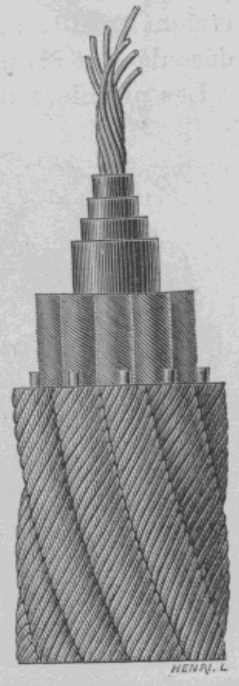
dans la partie orientale de l'Atlantique, à la hauteur de l'Irlande, est restée célèbre. On reconnut que le fond de la mer (fig. 22), loin de former un précipice entre les profondeurs de deux cent quatre-vingt-dix brasses et le plateau télégraphique, s'abaisse en pente très douce et qu'au delà de cinq à six cents brasses, le sol est recouvert d'une épaisse couche d'*ooze*, vase molle formée de coquillages microscopiques dont le dépôt augmente tous les jours et merveilleusement disposée pour recevoir des câbles. Des bancs de roches faciles à éviter, sur lesquels devait reposer le câble de 1858, furent reconnus sur la côte de Terre-Neuve, comme sur celle d'Irlande, et de nouveaux atterrissages donnant toute sécurité aux câbles qui y seraient posés, choisis l'un à Heart's Content, dans l'île de Terre-Neuve, l'autre à Foilhommerum, près de Valentia.

Le nom et l'idée de plateau télégraphique ne disparurent toutefois qu'après la découverte faite sur ce terrain, en 1874, par le navire *Faraday* appartenant à la maison Siemens frères, de dénivellations plus importantes même que celle qui le sépare du continent européen. Ces accidents de terrain, connus aujourd'hui sous le nom de *Collines de Faraday*, n'ont pas peu contribué à faire abandonner l'ancienne route.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La Compagnie constitua en même temps un Comité technique consultatif composé de MM. Fairbairn, Wheatstone, W. Thomson, Whitworth et Douglas Galton et confia à M. Cromwell F. Varley la direction des essais électriques.

L'âme, proposée par MM. Elliot et C^ie^ et adoptée pour le nouveau câble, devait être composée d'un toron de sept brins de cuivre de 1,2 millimètre de diamètre chacun, pesant ensemble 136 kilogrammes par mille marin, et recouvert de quatre couches de gutta-percha et de composition Chatterton pesant 182 kilogrammes par mille. Le fil central du toron de cuivre devait être recouvert de composition Chatterton de manière à empêcher de petites bulles d'air de rester emprisonnées dans les intervalles qu'eût laissés la juxtaposition des différents fils, lors du revêtement de la gutta-percha. La conductibilité du cuivre employé devait être égale au moins aux 0,85 de celle du cuivre chimiquement pur. Le conducteur ayant une section environ trois fois plus grande que celle du conducteur du câble de 1858, et une résistance électrique bien inférieure en raison de sa plus grande pureté, on comptait pouvoir transmettre, après la pose, jusqu'à sept mots par minute.



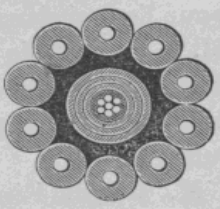


Fig. 23.

L'âme du câble devait être recouverte d'un matelas de chanvre tanné par-dessus lequel devaient être enroulés en hélice dix fils de fer homogène (acier Bessemer) de 2,5 millimètres de diamètre et pouvant résister chacun à une traction de 400 kilogrammes. Chaque fil de fer (fig. 23) devait être entouré séparément d'une couche de chanvre de Manille ou jute imprégné d'une composition de goudron, caoutchouc et poix, destinée à protéger les fils de fer contre l'oxydation et à diminuer le poids spécifique du câble; l'expérience avait, en outre, fait connaître que la résistance à la rupture d'un fil de fer entouré de chanvre est supérieure à la somme des résistances du fer et du chanvre pris séparément. Aussi, comptait-on que le câble de grands fonds ou « *deep sea* » résisterait à une traction supérieure à sept tonnes. Il devait peser dans l'air 1818 kilogrammes par mille marin et 722 kilogrammes seulement dans l'eau : son diamètre total devait être de 27 millimètres.

Le câble d'atterrissement ou « *shore end* » (fig. 24) devait être pourvu d'une seconde armature composée de douze torons dont chacun devait com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

prendre trois fils de fer galvanisés de 6,5 millimètres de diamètre : son poids devait être de 20 tonnes par mille et son diamètre de 56 millimètres. Il devait être relié au *deep sea* par une partie de diamètre graduellement diminuée et longue de 250 brasses.

L'âme du câble fut fabriquée par la *Compagnie de la Gutta-percha*. Chaque section de trois milles était plongée pendant vingt-quatre heures dans l'eau à 24° C. et rejetée si son isolement par mille marin était inférieur à 150 millions d'unités Siemens : les résistances constatées ont été presque toujours supérieures au double du minimum exigé. Les bobines étaient ensuite soumises à de nouveaux essais faits sous pression et enfin déroulées et examinées à la main avec le plus grand soin.

Les premiers essais sous pression des fils recouverts se firent en enfermant les fils, obturés à l'une de leurs extrémités, dans des tubes en fer C, C, de 110 mètres de longueur et de 0,0125 mètre de diamètre intérieur. Ces tubes (fig. 25) étaient en communication d'une part avec une presse hydraulique B, et d'autre part avec un cylindre D contenant un piston E dont la tige supportait, à l'aide de quatre chaînes, un plateau A chargé de poids suffisants pour donner à l'eau la pression voulue. L'extrémité libre des fils aboutissait à une boîte F, recouverte d'une glace et contenant un électromètre de Peltier avec les appareils accessoires nécessaires pour l'envoi dans les fils du courant d'une pile. On observait, pour chaque fil, le courant de perte et celui de décharge, immédiatement avant et immédiatement après l'application de la pression. La température à laquelle étaient soumis les fils se lisait sur des thermomètres qui traversaient les tubes C.

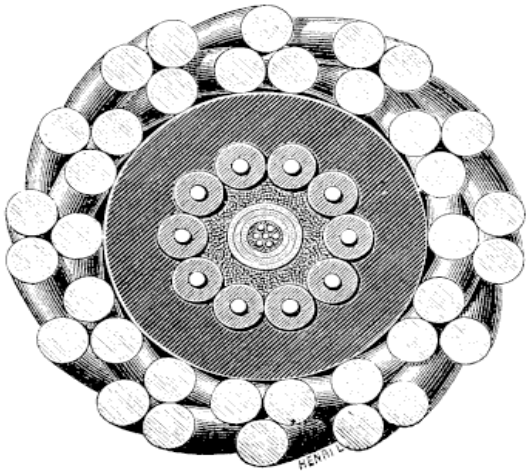


Fig. 24.

M. W. Reid imagina plus tard un appareil, d'un usage plus commode, qui consistait (fig. 26) en un grand cylindre de fer B, fermé par un couvercle mobile A, et dans lequel on introduisait la bobine de fil à essayer. L'une des extrémités du fil était obturée, l'autre passait, à travers une tubulure rendue bien étanche par du caoutchouc, à l'extérieur du cylindre et était reliée à une pile et à un galvanomètre très sensible. Le cylindre était d'abord mis en communication avec une pompe à air D, à l'aide de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

laquelle on produisait un vide aussi parfait que possible ; il était ensuite rempli d'eau fournie par un réservoir E et soumis à l'action d'une presse hydraulique F qui comprimait la masse d'eau avec le fil qui y était plongé, à une pression pouvant atteindre 1400 kilogrammes par centimètre carré : cette pression est celle que supporterait, dans la mer, un câble immergé à

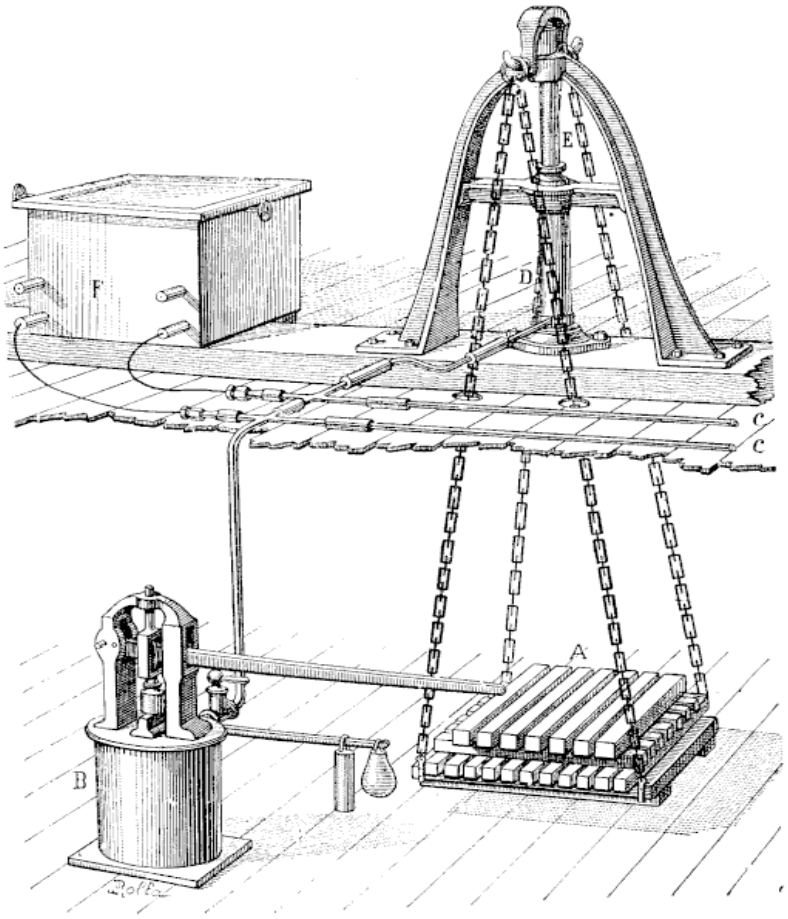


Fig. 25.

14 kilomètres de profondeur. Au bout de quelques heures, les bulles d'air, s'il en existait dans l'enveloppe isolante du fil, déterminaient, dans cette enveloppe, de petites fissures que l'application du courant négatif élargissait immédiatement et dont la présence était révélée alors par le galvanomètre. Le fil retiré de l'appareil était enroulé sur une autre bobine en passant entre les doigts d'un ouvrier exercé qui devait reconnaître au toucher toutes les gerçures de la gutta, les réparer si l'avarie était légère, et cou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

per la gutta pour faire une soudure complète, si le défaut semblait plus grave.

Le revêtement de chanvre et de fer fut fait par la *Telegraph Construction and Maintenance C^ie*, sous la direction de MM. Glass et Elliot. Les bobines d'âme, avant d'être mises en œuvre, furent conservées sous l'eau dans des

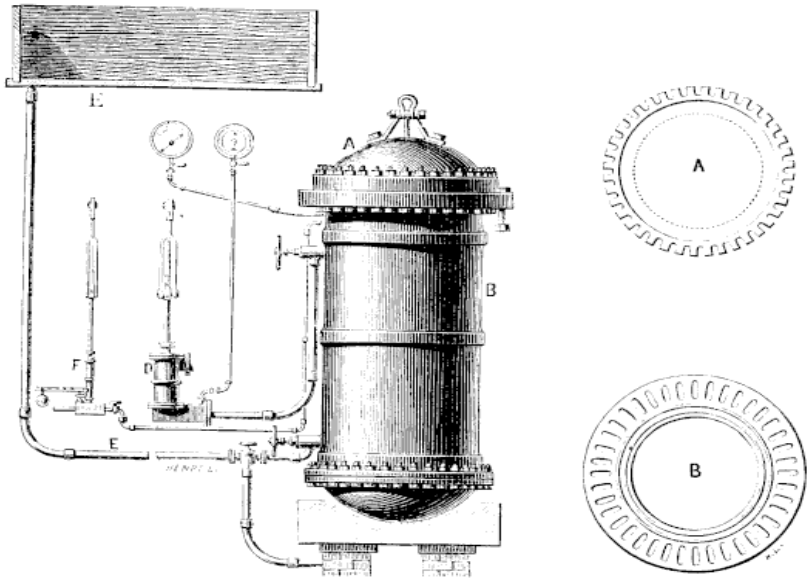


Fig. 26.

réservoirs fermés à clef et le câble une fois fabriqué fut lové dans huit énormes cuves en tôle, bien étanches, remplies d'eau et soumis à des essais renouvelés tous les jours, à la fois par les entrepreneurs et par les électriciens de la *Compagnie atlantique*.

L'expédition de 1857 ayant démontré les inconvénients de l'immersion simultanée d'un câble par deux navires, partant en sens opposé du milieu de la route à parcourir, on résolut d'embarquer les 2300 milles de câble qui avaient été fabriqués, sur un immense bâtiment de 22500 tonneaux, le *Great Eastern*, qui était resté sans emploi depuis plusieurs années. Le *Great Eastern* ne pouvant accoster les appontements de l'usine d'*East Greenwich*, le câble dut être coupé en plusieurs morceaux qui furent lovés sur deux pontons que l'amirauté mit à la disposition de la Compagnie ; une petite machine à vapeur spéciale, actionnant une roue à gorge surmontée d'une poulie jockey par lesquelles le câble, saisi comme entre les deux cylindres d'un laminoir, était entraîné, le halait ensuite à bord du *Great Eastern ;* il y était enroulé dans trois grandes cuves en fer étanches qui avaient été disposées à cet effet dans les flancs du vaste navire : les cuves

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du milieu et de l'arrière avaient 17,50 mètres de diamètre sur 6,25 mètres de hauteur, celle de l'avant n'avait que 15,75 mètres de diamètre.

Le câble d'atterrissement, de 28 milles de longueur, fabriqué à *North Woolwich* par M. Henley, fut embarqué sur un bâtiment spécial et immergé le 22 juillet 1865. Le lendemain, le *Great Eastern*, commandé par le capitaine Anderson, souda l'extrémité de son câble à celle du câble d'atterrissement et se dirigea vers l'Amérique, avec une vitesse de six nœuds, escorté par deux navires de guerre de la marine britannique, le *Sphinx* et le *Terrible*. L'ingénieur Canning dirigeait les opérations de pose; MM. W. Thomson et F. Varley étaient chargés de la partie électrique.

Un premier défaut se déclara le 24, après l'immersion de 84 milles de câble. On se décida à relever la partie immergée jusqu'au défaut qu'on trouva après avoir retiré de la mer dix milles et demi de câble; celui-ci avait été traversé diamétralement par un morceau de fil de fer qui mettait le conducteur central en cuivre en communication directe avec l'eau de mer. La partie défectueuse fut retranchée et le déroulement repris immédiatement après la confection de l'épissure.

Le 29 juillet, lorsque 716 milles de câble étaient immergés, une nouvelle perte plus sérieuse que la première se manifesta. On recommença la pénible opération du relèvement et, après neuf heures de travail, on remonta à bord le défaut qui fut réparé. En dépouillant le câble, on trouva encore un bout de fil de fer qui traversait le câble de part en part. L'inquiétude gagna tout le monde et fut d'autant plus vive que l'on crut devoir attribuer ces différents accidents à la malveillance.

Le 2 août, une nouvelle faute fut signalée : on était aux deux tiers de la route, 1186 milles de câble se trouvant déjà immergés. Il fallut reprendre le relèvement par 2000 brasses de fond. On avait retiré de la mer un mille de câble, lorsqu'une avarie survint à la machine de relèvement. Le *Great Eastern* ayant dû stopper lui-même, resta à la merci du vent et de la houle; le câble, exposé à de fortes tractions, s'endommagea gravement en deux places et, avant qu'on eût pu haler à bord les deux parties avariées, se rompit et tomba à la mer.

M. Canning se décida immédiatement à essayer de repêcher le câble, malgré les 2000 brasses d'eau qui le recouvraient, et bien qu'on n'eût jamais jusqu'alors dragué à cette profondeur. On descendit dans la mer un grappin en fer attaché à un cordage métallique qu'on avait emporté, pour le cas où l'on aurait à placer un repère dans la mer, ou à couper le câble, par suite de quelque accident imprévu, et à le rattacher temporairement à une bouée ; le cordage, divisé en pièces de 100 brasses de long chacune, mesurait en totalité 5000 brasses. Le bâtiment se mit ensuite à courir de petites bordées en travers de la ligne du câble englouti. Au bout de quinze heures

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de cette manœuvre, on reconnut, à la tension indiquée par le dynamomètre, que le câble avait été saisi et on le remonta avec le grappin. On avait déjà relevé 700 brasses de cordage métallique, lorsqu'un des anneaux en fer d'un maillon de jonction céda et laissa retomber à la mer tout ce qui se trouvait en dehors du navire. L'opération fut reprise, avec des cordes, à deux milles plus à l'ouest, sur des fonds de 2300 brasses. Le 8 août, le câble fut de nouveau saisi ; lorsqu'il ne se trouva plus qu'à 1500 brasses du navire, l'un des anneaux de jonction se brisa encore sous une tension qui atteignit 9 tonnes.

On tenta un dernier effort : une première fois le grappin s'embarrassa dans la corde et dut être relevé ; une deuxième fois, tandis qu'on relevait la drague dont la tension allait croissant, une rupture se produisit de nouveau près du cabestan, lorsqu'on avait déjà retiré 765 brasses de corde de la mer. Les ressources en matériel de dragues étant complètement épuisées, il fallut abandonner l'opération et la flottille se dispersa.

Les résultats de cette nouvelle campagne, quelque désastreux qu'ils fussent au point de vue financier, loin d'abattre le courage des promoteurs de l'entreprise, ne servirent qu'à exciter leur énergie, en leur démontrant la probabilité et presque la certitude d'une réussite complète et prochaine. Par les plus gros temps, le *Great Eastern* avait fait preuve d'une stabilité remarquable : ses dimensions, sa facilité d'évolution due à la présence simultanée d'une hélice et de deux roues à aubes, en faisaient comme le navire type de ce genre d'opérations. Si la machinerie de relèvement s'était montrée insuffisante, celle de pose n'avait donné lieu à aucune critique sérieuse. On avait constaté la possibilité de draguer et entrevu celle de relever un câble sur des fonds de 2000 brasses. Enfin, on avait reconnu que, grâce à la fois à la basse température des eaux profondes de l'océan et à la pression énorme à laquelle est soumis le câble au fond de la mer, l'isolement de la gutta-percha après son immersion est plus que centuplé, tandis que la conductibilité du cuivre, tout en profitant de l'abaissement de la température, n'est pas affectée sensiblement par la pression.

La loi anglaise ne permettant aux Compagnies ni d'augmenter leur capital, ni de contracter un emprunt, l'*Atlantic Telegraph C°* se sacrifia pour faire place à une nouvelle Société, l'*Anglo-American C°*, qui se forma au capital de quinze millions de francs et se proposa non seulement d'immerger un nouveau câble entre l'Irlande et Terre-Neuve, mais de réparer et compléter celui qui gisait au fond de la mer. M. G. Saward, secrétaire de la Compagnie, ayant réussi à faire souscrire le capital social, une longueur de 1600 milles marins de câble fut commandée à MM. Glass, Elliot et C^ie^ : la longueur totale disponible au départ de l'expédition devait par suite être de 2730 milles, dont 1960 milles prévus pour constituer le nouveau câble,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

697 pour compléter l'ancien, et les 113 milles restants comme réserve pour l'imprévu. Le mou ou différence entre la longueur de câble dépensée et le chemin parcouru par le navire, n'ayant été que de 8 p. 100, l'approvisionnement de câble ainsi préparé devait être suffisant.

L'âme du nouveau câble fut exactement semblable à celle du câble de l'année précédente : mais on renonça à soumettre les bobines d'âme à des essais électriques sous pression, celle-ci, loin de rendre les défauts apparents, tendant au contraire à les masquer. Les fils de fer de l'armature furent galvanisés et on supprima la composition dont était enduit le jute qui entourait ces fils. Le câble devait peser, par mille, dans l'air 1600 kilogrammes, dans l'eau 740 kilogrammes et résister à une traction de 8,25 tonnes ; son diamètre total devait être de 27 millimètres. Le câble d'atterrissement (fig. 27) n'eut plus qu'une seule armature et celle-ci fut composée de douze fils de fer jointifs que l'on recouvrit d'une enveloppe de chanvre imprégné d'une composition bitumineuse. On devait immerger, à partir de la côte d'Irlande, huit milles de câble de ce type et du modèle le plus fort ; à sa suite devaient être soudés huit milles de câble d'un modèle un peu plus faible et enfin quatorze milles d'un troisième câble semblable, mais d'un modèle encore plus réduit, portant ainsi la longueur totale de l'atterrissement irlandais à trente milles. Cinq milles avaient, au contraire, été jugés suffisants pour l'atterrissement de Terre-Neuve.

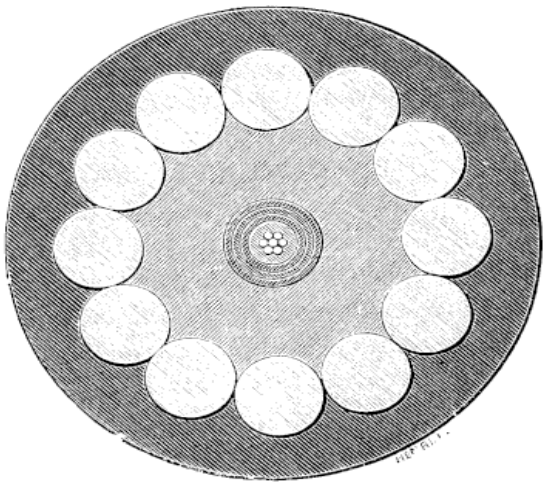


FIG. 27.

La machinerie de pose du *Great Eastern,* qui avait été installée avec le plus grand soin par MM. Canning et Clifford, se composait de six roues à gorges, verticales, placées les unes derrière les autres et supportant chacune une poulie jockey assez étroite pour pouvoir s'engager dans la gorge des roues. Les poulies jockeys pouvaient tourner autour d'axes soutenus par des chapes mobiles autour de leur extrémité opposée : le levier placé dans le prolongement de la chape pouvait être chargé de poids, de manière à ce que l'on pût faire varier à volonté la pression exercée par les jockeys sur les roues et par conséquent sur le câble qui passait entre les roues et les jockeys. Sur l'axe qui supportait chacune des six roues à gorges était monté un petit frein que l'on serrait ou desserrait à la main. Le câble, en sortant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la cuve, passait dans un guide, traversait en ligne droite l'espace resté libre entre les six roues à gorges et leurs poulies jockeys, et arrivait, guidé par un rouleau, à un grand tambour de deux mètres de diamètre et de trente centimètres de largeur, sur lequel il faisait quatre tours, s'enroulait sur un autre tambour semblable séparé du premier par un rouleau directeur, enfin passait sous un dynamomètre et tombait à la mer guidé par une roue à gorge qui surplombait l'arrière du navire.

L'axe de chaque tambour portait deux freins du système Appold, semblables à ceux qui accompagnaient les six roues à gorge et tournant dans des auges remplies d'eau : pour éviter tout échauffement du câble, celui-ci était arrosé abondamment à son passage dans les poulies jockeys. Les deux tambours et les freins correspondants devaient se servir réciproquement de rechange, de manière que l'un de ces systèmes fût toujours prêt à fonctionner dans le cas où une avarie surviendrait à l'autre. Les freins étaient serrés et desserrés par l'intermédiaire d'une chaîne qui s'enroulait sur l'axe d'une roue de gouvernail que manœuvrait un homme placé près du dynamomètre.

Fig. 28.

Cette installation fut complétée par l'addition d'une machine à vapeur de 70 chevaux actionnant les deux grands tambours, afin que la machinerie de pose pût servir au relevage du câble, dans le cas où cette opération deviendrait nécessaire durant l'immersion, en évitant ainsi les dangers que présente le transport du câble de l'arrière à l'avant du navire.

La machinerie spéciale de relèvement fut considérablement renforcée et complétée par deux tambours de 1,70 mètre de diamètre actionnés par une machine à vapeur de 70 chevaux. Des machines analogues furent installées sur les deux bâtiments, la *Medway* et l'*Albany*, qui devaient assister le *Great Eastern* dans ses travaux.

En vue des dragages auxquels devait donner lieu l'achèvement du câble de 1865, on fabriqua vingt milles d'un cordage composé de quarante-neuf fils de fer de 2,2 millimètres de diamètre entourés séparément de chanvre de Manille. Six de ces fils étaient d'abord tordus autour d'un septième de manière à former un toron; six torons semblables étaient ensuite câblés autour d'un septième. La résistance à la rupture de ce cordage était de 29 tonnes 1/2.

A ce matériel on ajouta encore cinq milles de cordages pour bouées, des bouées de modèles différents et dont les plus grandes pouvaient porter 20 tonnes de poids utile, enfin des grappins, les uns destinés simplement à labourer le fond de la mer, d'autres (fig. 28) munis de ressorts pour empêcher le câble de s'échapper pendant que le grappin traînerait encore sur le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fond, d'autres en forme de pinces destinés à saisir fortement le câble quand il serait soulevé à une certaine hauteur.

Les machines motrices du *Great Eastern* reçurent également diverses améliorations : les deux roues à aubes furent réduites pour diminuer la vitesse du navire qui ne devait pas dépasser six nœuds et rendues indépendantes l'une de l'autre, pour permettre au bâtiment de tourner rapidement sur lui-même ; l'hélice fut enveloppée d'une cage métallique pour en éloigner les câbles et cordages de dragues ou de bouées.

Les méthodes d'essais électriques furent, en outre, perfectionnées de telle sorte que l'isolement du câble fût indiqué par les appareils sans aucune interruption, même durant la mesure de la conductibilité du conducteur ou l'échange des transmissions avec Valentia. On ne risquait plus ainsi de laisser sortir du navire un point défectueux du câble pendant sa pose.

Le 30 juin 1866, le *Great Eastern*, suivi de l'*Albany* et de la *Medway* laquelle, en outre du câble d'atterrissement destiné à la côte américaine, avait reçu 45 milles de câble de mer profonde, se rendit de la Tamise à Valentia, où il trouva le *Terrible* et le *Raccoon*, de la marine royale britannique, qui avaient reçu mission d'accompagner l'expédition.

Le 7 juillet, le *William Cory* porta à terre, dans la baie de Foilhommerum, le câble d'atterrissement et en immergea ensuite 27 milles : le 13, la soudure de ce câble fut faite à bord du *Great Eastern* sur les trois milles de câble semblable qui étaient lovés par-dessus le câble de grands fonds et le déroulement commença aussitôt après. Le navire suivit une route parallèle à celle qu'il avait faite l'année précédente, à 27 milles environ plus au sud, et le 27 juillet, arriva dans la baie d'*Heart's Content*, ayant heureusement terminé la première partie de sa mission. La longueur totale de câble immergé n'était que de 1852 milles.

Il restait encore à trouver l'extrémité du câble qui s'était rompu le 2 août 1865 à 604 milles de Terre-Neuve, à la remonter jusqu'au navire pour l'épisser sur le câble en réserve à bord, et à compléter l'opération si malheureusement interrompue l'année précédente. On se fera une idée des difficultés de cette entreprise en remarquant que le câble reposait sur le fond de la mer, à plus de 2000 brasses de profondeur, sans aucun repère visible pour en indiquer la position, les bouées qui avaient été immergées après l'accident ayant disparu depuis longtemps, soit que la tempête les eût fait chasser sur leurs ancres, soit que le clapotement ininterrompu de l'eau eût coupé à la longue les cordages métalliques qui les rattachaient au fond. Des observations astronomiques seules pouvaient donc permettre de retrouver la route suivie par le *Great Eastern* en 1865 et par suite le tracé du câble : or, ces observations, qui exigent un ciel découvert et ne peuvent être répétées fréquemment, laissent néanmoins encore une certaine incer-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

titude dans la position exacte du navire, en raison des courants si variables qui sillonnent l'Océan et qui atteignent jusqu'à trois quarts de nœud par heure. D'un autre côté, pour draguer, relever et hisser un câble à bord, un temps à peu près calme est indispensable et, même au mois d'août, on ne peut compter, dans les parages où le *Great Eastern* devait opérer, sur une succession de beaux jours.

Les chefs de l'expédition, pleins de confiance cependant dans le résultat de leur entreprise, hâtèrent leurs préparatifs et le 9 août 1866, le *Great Eastern* reprit la mer avec la *Medway*. Le 12 août, les deux navires rencontrèrent, sur le lieu des opérations, le *Terrible* et l'*Albany*, qui étaient partis de Heart's Content une huitaine de jours avant eux, pour placer des bouées sur le tracé du câble de 1865 et commencer les dragages.

Le plan de M. Canning consistait à faire draguer le câble dans le voisinage du bout, par les trois navires en même temps ; le câble, une fois soutenu à une certaine hauteur, devait ensuite être brisé par la *Medway*, placée à l'ouest du *Great Eastern*, de manière à permettre à celui-ci de hisser jusqu'à son bord le bout côté de Valentia du câble rompu.

A l'arrivée du *Great Eastern*, l'*Albany* avait déjà saisi et amarré le câble à une bouée : mais la chaîne d'attache de cette bouée s'étant rompue, le câble était retombé au fond de la mer avec 2000 brasses de cordage métallique.

Le 13 août, le *Great Eastern* fit un premier dragage à une quinzaine de milles du bout du câble ; après diverses tentatives restées sans résultat, le câble fut enfin saisi et soulevé à 1300 brasses du fond. Tandis que l'on se disposait à relier à une grande bouée le cordage métallique qui retenait le grappin, une fausse manœuvre laissa échapper le cordage qui retomba dans la mer avec le câble.

Le *Great Eastern* s'éloigna de six milles dans l'est du point où cet accident s'était produit et commença un nouveau dragage avec 2400 brasses de cordage métallique. Vers onze heures du soir, le grappin émergeait au-dessus de l'eau portant, sur deux de ses branches, le câble recouvert sur une moitié de son épaisseur d'une couche de vase blanchâtre ; l'autre partie était aussi noire et aussi brillante qu'au moment de la sortie du câble de l'usine, preuve incontestable qu'en ce point au moins le câble n'était pas enfoui sous une épaisse couche de vase ou de sable, ainsi qu'on avait pu le craindre. Des embarcations avaient en toute hâte accosté le grappin et cherchaient à amarrer celui-ci à une pince reliée à un fort cordage métallique, lorsque, par suite de l'inclinaison donnée au grappin, le câble échappa à ses griffes et disparut dans la mer.

Le câble fut cependant encore une fois saisi le 19 août et relevé à mille

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

brasses au-dessus du fond, mais l'état de la mer ne permit pas de le relier à une bouée. Durant toute la semaine suivante, les trois navires draguèrent en différents points suivant le programme qui avait été arrêté à l'avance: mais le temps était défavorable et les dragues restaient sans résultat, ou le câble, lorsqu'on était parvenu à l'accrocher, échappait aux grappins. Un profond découragement commençait à s'emparer de presque tout l'équipage, de plus en plus convaincu de l'inutilité de ses efforts.

Le 27 août, l'*Albany* signala qu'il avait amené, avec une tension de trois tonnes seulement, le câble à bord et que celui-ci était relié à une bouée: mais on reconnut rapidement que cette bouée était à treize milles du tracé du câble et qu'on avait repris un bout de câble de deux milles de longueur qui avait été jeté à la mer quelques jours auparavant.

Le champ des opérations des trois navires ayant été reporté successivement à une quinzaine de milles à l'est du point où elles avaient été entreprises, s'effectuaient à ce moment sur des fonds de 2500 brasses ; l'approvisionnement de cordages à draguer diminuant tous les jours et la mauvaise saison approchant rapidement, M. Canning se décida à se transporter immédiatement à 80 milles dans l'est, où l'on devait trouver des fonds de 1900 brasses seulement, et à y tenter ses dernières chances de succès.

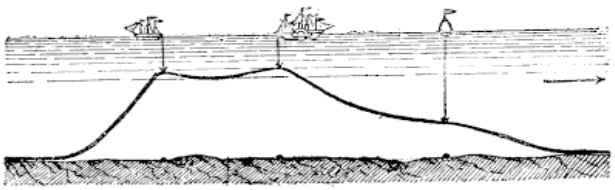


Fig. 29.

Le 31 août, le câble fut dragué avec succès et le relevage commencé par un temps très calme : lorsqu'il se trouva à 800 brasses de la surface de la mer, le cordage qui retenait le grappin fut relié à une grande bouée. Le *Great Eastern* alla draguer immédiatement à trois milles à l'ouest de cette bouée et la *Medway* à deux milles à l'ouest du *Great Eastern* (fig. 29) : le câble fut saisi rapidement par les deux navires, relevé, puis, d'après les ordres qui lui furent transmis, cassé par la *Medway* à trois cents brasses de la surface de la mer. Le *Great Eastern*, qui, après avoir amené le câble à 800 brasses de la surface de l'eau, en avait arrêté le relevage, s'empressa de reprendre l'opération dès que la rupture intentionnelle du câble eut diminué sa tension qui, de 10 à 11 tonnes, tomba à près de moitié. Enfin, à 1 heure du matin, le 2 septembre, le câble parut au-dessus de l'eau ; deux heures plus tard, il arriva à bord et bientôt après on échangea les premiers signaux avec Valentia.

Le bout du câble fut épissé sans délai sur celui en réserve à bord, et à 7 heures du matin, le *Great Eastern* reprit l'immersion en se dirigeant vers Terre-Neuve.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le 8 septembre, le navire ne se trouvait plus qu'à treize milles de Heart's Content, lorsque les appareils d'essais signalèrent l'existence d'un défaut dans le câble. On reconnut bientôt que la faute se trouvait à bord et était due à un bout de fil de fer cassé qui, sous le poids des hommes chargés du déroulement du câble dans les cuves, s'était replié à angle droit et avait pénétré jusqu'au conducteur en cuivre. Ainsi tombèrent toutes les suppositions qui avaient fait attribuer à la malveillance les différentes avaries survenues l'année précédente dans des conditions absolument semblables.

La partie fautive ayant été éliminée sans délai, le déroulement fut repris et terminé à 11 heures du matin. La *Medway* procéda immédiatement à l'immersion du câble d'atterrissement et le soir même, la deuxième communication était établie à travers l'Atlantique. La longeur totale du câble immergé était de 1896 milles.

Les noms des chefs de cette mémorable expédition méritent d'être cités: comme l'année précédente, le capitaine Anderson commandait le *Great Eastern,* M. Canning dirigeait les travaux de pose et de réparation, MM. W. Thomson et Willoughby Smith présidaient aux essais électriques; M. Varley, resté à terre, remplissait les mêmes fonctions à la station de Valentia.

Le succès de ces deux importantes opérations ouvrit une ère nouvelle à la télégraphie sous-marine. La période des débuts était virtuellement terminée: si bien des progrès de détail restaient encore à réaliser, le type de câbles qui convenait aux plus grandes profondeurs de la mer, de même que les engins et procédés, tant d'immersion que de réparation, étaient trouvés; des appareils perfectionnés pour la transmission rapide des signaux avaient été construits et des méthodes nouvelles et plus précises inventées, tant pour la vérification des conditions électriques des lignes sous-marines que pour la localisation des défauts qui peuvent se produire durant leur fabrication ou après leur immersion. De nombreuses compagnies ne tardèrent pas à se former pour exploiter le nouveau domaine qui était offert à l'activité humaine et engagèrent successivement des centaines de millions dans leurs entreprises. En 1869, la France fut reliée directement à l'Amérique par un câble partant de Brest et aboutissant à l'île Saint-Pierre-Miquelon. Aujourd'hui les communications entre les deux mondes sont assurées par dix câbles (fig. 30 et 31) indépendamment de ceux de 1865 et 1866, qui ont été interrompus, le premier en 1873, le second en 1877, et abandonnés après quelques tentatives infructueuses faites pour les réparer; une double ligne sous-marine relie aussi l'Europe directement à l'Amérique du Sud et à la côte occidentale de l'Afrique; la grande ligne des Indes a été prolongée jusqu'en Chine et au Japon et des embranchements desservent l'Australie

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

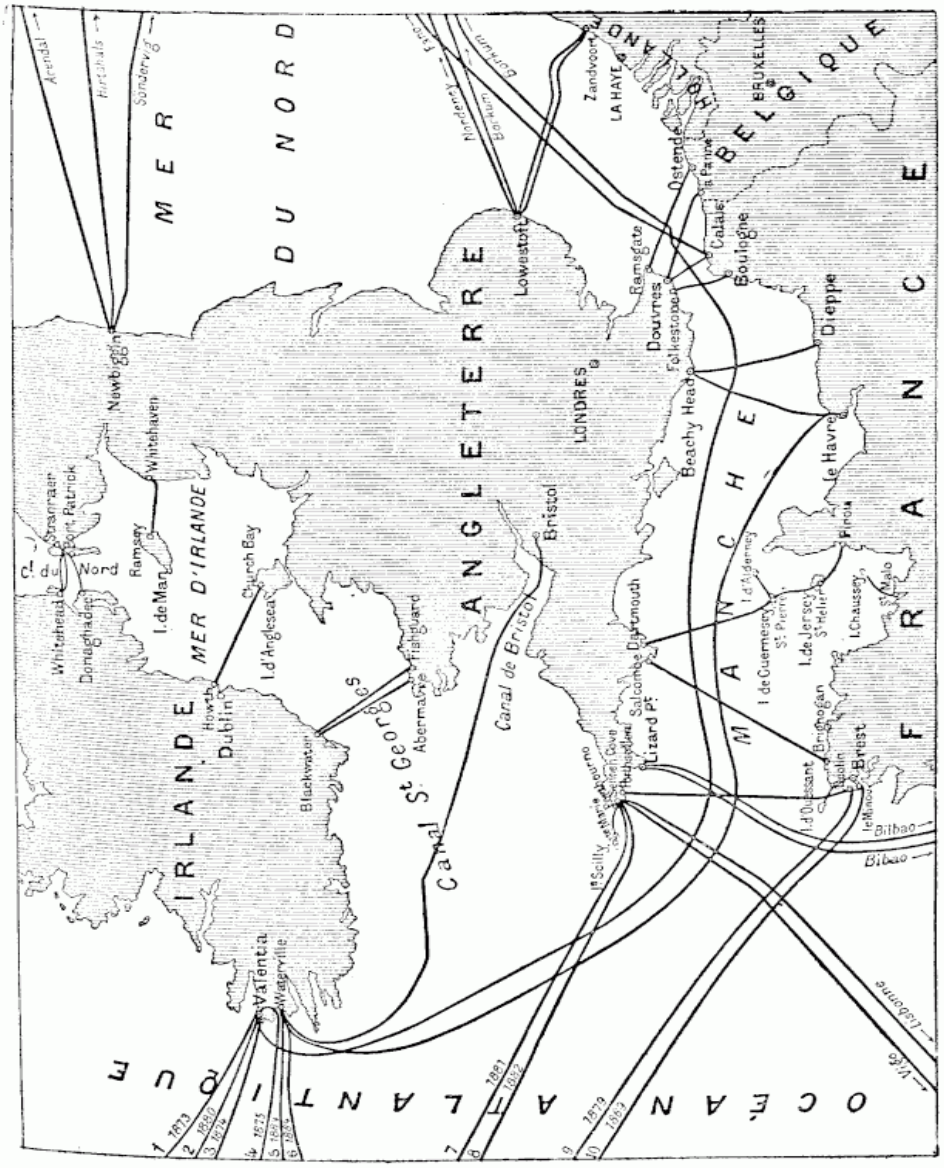


Fig. 30. — Atterrissements sur les côtes d'Europe des câbles atlantiques du Nord.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

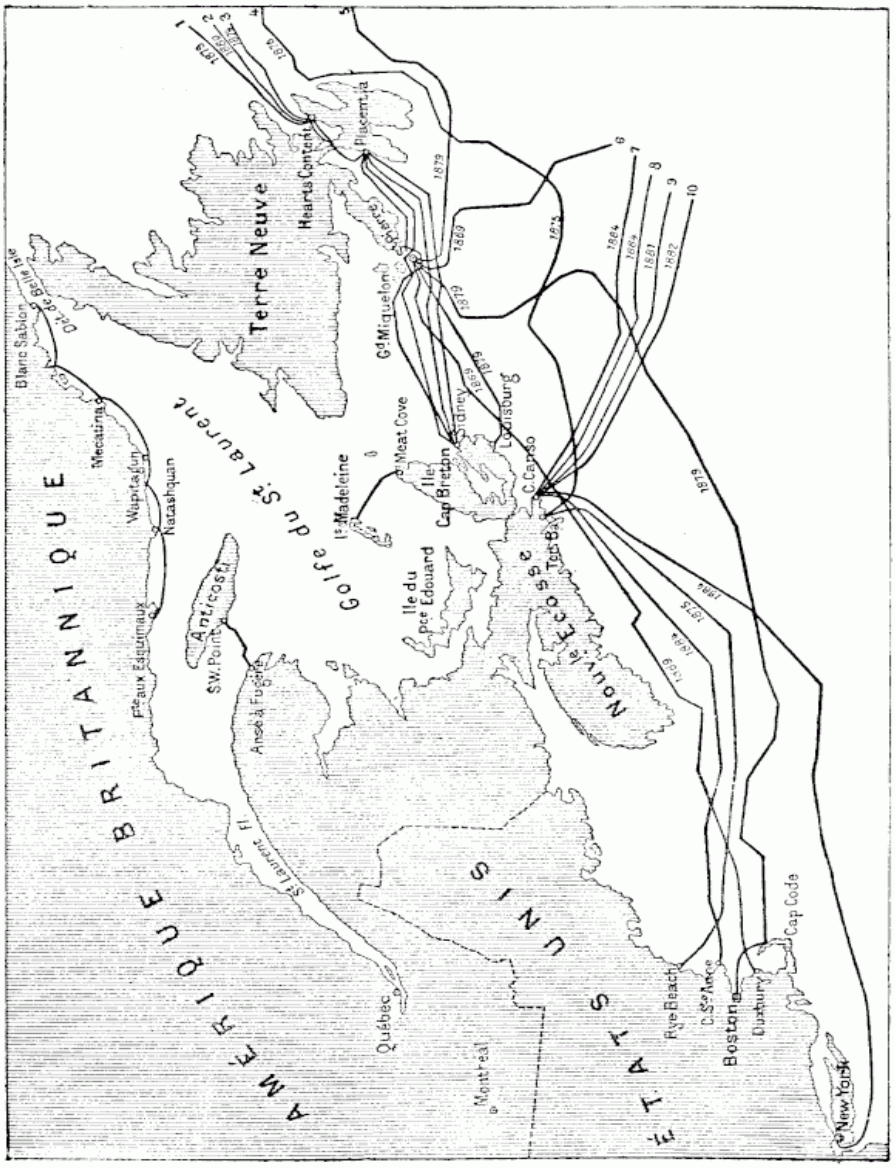


Fig. 31. — Atterrissements sur les côtes d'Amérique des câbles atlantiques du Nord.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

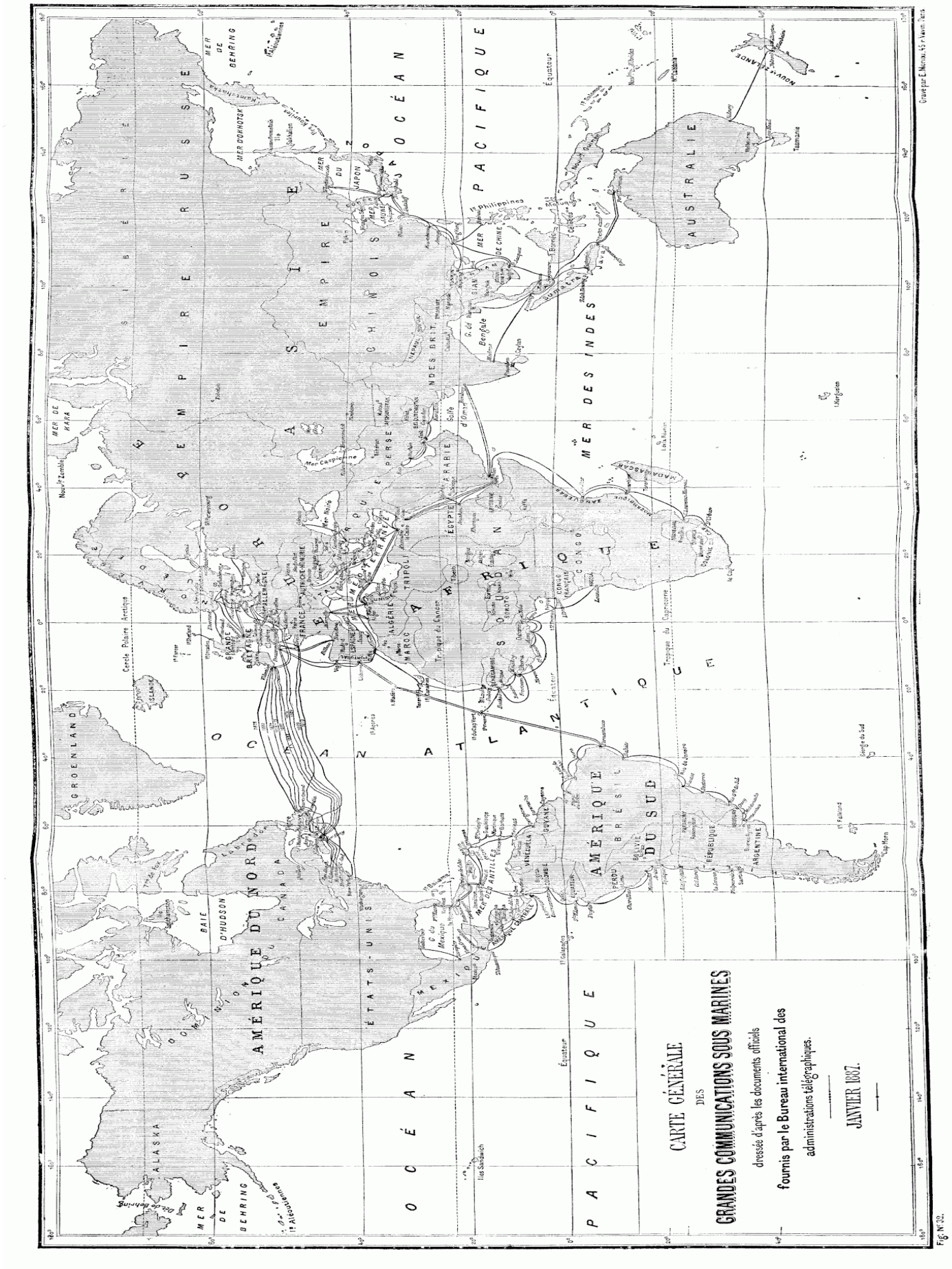


Fig. N°12.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et la côte orientale de l'Afrique. Le globe presque tout entier est recouvert maintenant d'un vaste réseau de câbles sous-marins qui, au mois de janvier 1887, ne comptait pas moins de 113565 milles de câbles en service, représentant un capital d'environ 925 millions de francs et qui va se développant chaque année. Ce réseau fera le tour de la terre, ainsi que le montre un simple coup d'œil jeté sur la carte ci-jointe des communications télégraphiques sous-marines existant au 1er janvier 1887 (fig. 32), le jour où un câble télégraphique mettra l'Asie en relation directe avec le continent américain. Une flotte comprenant 27 navires de tous tonnages, répartis dans toutes les mers, est affectée à l'entretien de ce vaste réseau, qui est devenu une nécessité pour notre époque et sera l'une des gloires de notre siècle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DEUXIÈME PARTIE

COMPOSITION ET FABRICATION DES CABLES TÉLÉGRAPHIQUES SOUS-MARINS

Malgré les modifications qu'on a proposé, à diverses reprises, d'apporter à leur construction, tous les câbles sous-marins [1] immergés jusqu'à ce jour ont été établis d'après le type créé par M. Crampton en 1851, pour la ligne de Douvres à Calais, et comprennent :

1° Un conducteur central dans lequel circule le courant électrique;

2° Une enveloppe isolante empêchant la déperdition de l'électricité du fil central au milieu conducteur dans lequel le câble est immergé ;

3° Un revêtement extérieur destiné à protéger l'enveloppe isolante contre les avaries qui pourraient l'atteindre durant la pose et à donner au câble une ténacité suffisante pour en permettre le relevage ultérieur en cas de besoin.

L'ensemble du conducteur et de son enveloppe isolante se désigne généralement sous le nom d'*âme*.

CHAPITRE PREMIER

CONDUCTEUR

Cuivre. — Propriétés physiques. — Forme du conducteur. — Fabrication.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET ÉLECTRIQUES DU CUIVRE

Le cuivre étant de tous les métaux usuels celui dont la conductibilité électrique est la plus élevée, a été, jusqu'à ce jour, presque universellement adopté pour former le conducteur central des câbles sous-marins.

Le tableau ci-dessous donne, d'après M. Benoit, la conductibilité, par

[1] Il faut en excepter le câble de la mer Noire, qui n'a eu qu'une durée éphémère, celui d'Oran à Carthagène, qui n'a jamais pu être complété, et quelques autres lignes plus anciennes et de moindre importance qui n'ont également pu fonctionner.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rapport à l'argent pur, des principaux métaux et alliages, à la température de 0° centigrade[1] :

Argent pur recuit	100
Cuivre recuit[2]	90
Argent (750/1000) recuit	80
Or pur recuit	71
Aluminium recuit	49,7
Magnésium écroui	36,4
Zinc pur recuit à 350°	27,3
Zinc pur écroui	25,9
Cadmium pur écroui	22,5
Laiton recuit	22,3
Acier recuit	14,0
Étain pur	13,3
Bronze d'aluminium recuit	13,0
Fer recuit	12,7
Palladium recuit	11,1
Platine recuit	9,77
Thallium	8,41
Plomb pur	7,76
Maillechort recuit	5,80
Mercure pur	1,61

Le cuivre jouit en outre de la propriété, précieuse pour les câbles sous-marins, de s'allonger de 10 à 15 p. 100 avant de se rompre. Il en résulte que si le câble est soumis à une traction, le conducteur ne peut se briser qu'après le revêtement protecteur extérieur et que la communication se trouve par suite maintenue jusqu'à la dernière limite. Le cuivre employé pour la construction des câbles sous-marins étant choisi plutôt en vue de ses propriétés électriques que de ses propriétés mécaniques, ne résiste généralement qu'à une traction de 28 à 29 kilogrammes par millimètre carré. On admet ordinairement, dans les applications télégraphiques, le nombre 8,89 comme représentant la densité de ce métal.

Dans les premiers temps de la télégraphie sous-marine, on croyait reconnaître suffisamment la pureté d'un cuivre par sa facilité à passer à la filière ; les causes des différences considérables que l'on remarquait entre les nombres obtenus par divers physiciens pour la conductibilité de ce métal restaient inexpliquées. Cette conductibilité, rapportée à celle de l'argent représentée par 100, était de

95,3	suivant	Becquerel	200	suivant	Harriss
67,2	—	Riess	95,4	—	Buff
73,4	—	Lenz	73	—	Pouillet
91,2	—	Davy	98,7	—	Arndsten
66,0	—	Christie			

Dans cette liste, les nombres obtenus par Becquerel, Lenz et Arndsten,

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, année 1873, vol. LXXVI.

[2] MM. Matthiessen et van Bose avaient trouvé pour la conductibilité du cuivre, obtenu par l'électrolyse : 99, 95. (*Annales de Poggendorff*, année 1862, vol. CXV.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seuls, correspondent à des mesures prises à une température uniforme qui était de 0° centigrade.

En 1857, durant la fabrication du premier câble atlantique, Sir W. Thomson reconnut que la présence dans le cuivre de substances étrangères, même en quantités minimes, altérait, dans des proportions très marquées, la conductibilité de ce métal, et il signala les conséquences qui en résulteraient pour la vitesse de transmission des signaux dans le câble. Sur la demande du comité d'enquête nommé par le gouvernement anglais et la Compagnie atlantique, le docteur Matthiessen fit, en 1860, une étude complète de la question. Il observa d'abord l'effet qu'exerce sur la conductibilité du cuivre pur, préparé avec les plus grands soins par l'électrolyse, l'introduction des principales substances que l'on rencontre associées au cuivre naturel, et analysa ensuite différents échantillons de cuivres du commerce dont il mesura la conductibilité électrique. Il reconnut que l'addition de simples traces d'arsenic fait tomber la conductibilité du cuivre de 100 à 60 ; lorsque la proportion d'arsenic atteint 5 p. 100, la conductibilité du cuivre n'est plus que de 6,5. Elle est réduite de 100 à 78 par l'addition de 0,05 de carbone ; à 92 par celle de 0,18 de soufre et à 70 par celle de 0,13 de phosphore. L'action de l'oxygène est encore plus énergique : en fondant du cuivre pur au contact de l'air, pendant très peu de temps, de telle sorte que les traces de sous-oxyde de cuivre formé ne pouvaient même être dosées par les moyens que l'analyse chimique possédait à cette époque, M. Matthiessen réduisait sa conductibilité à 76 ; elle se relevait à 96 en faisant passer dans le métal fondu, pendant trois heures, un courant d'hydrogène qui réduisait le sous-oxyde.

L'influence des métaux, quoique moins sensible en général que celle des métalloïdes, agit dans le même sens. Un alliage de cuivre pur et de 3,20 p. 100 de zinc n'a plus qu'une conductibilité représentée par 59 ; avec 1,33 p. 100 d'étain, elle tombe à 50 et à 35 avec 0,48 p. 100 de fer. L'addition de 1,22 p. 100 d'argent, le plus conducteur de tous les métaux, réduit à 90 la conductibilité du cuivre. Il en résulte qu'il est impossible d'augmenter artificiellement la conductibilité du cuivre pur et que l'addition à ce métal d'une autre substance quelconque a, au contraire, toujours pour effet de diminuer son pouvoir conducteur de l'électricité.

Les bons effets que l'on obtient, au point de vue de la malléabilité et de la ductilité, dans l'affinage du cuivre, par l'addition d'une petite quantité de plomb, s'expliquent par l'expérience suivante due également au docteur Matthiessen. Un échantillon de cuivre, fondu au contact de l'air, avait pour conductibilité 87 ; on y ajouta 0,1 p. 100 soit de plomb, soit d'étain, et le tout fut fondu dans un courant d'acide carbonique : la conductibilité remonta à 93, mais on reconnut qu'en même temps la quantité de plomb ou d'étain

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

restant dans le cuivre était si faible qu'elle ne pouvait plus être dosée. Le plomb et l'étain paraissent donc avoir réduit le sous-oxyde de cuivre et s'être éliminés ensuite en laissant un métal plus pur.

La mesure de la conductibilité de huit échantillons de cuivres du commerce de provenances diverses donna au docteur Matthiessen des nombres compris entre 98,78 et 14,24; l'analyse chimique lui révéla la présence, dans ces cuivres, de traces d'argent, de fer, de plomb, de nickel, d'antimoine, d'arsenic et de sous-oxyde de cuivre. L'échantillon classé en tête de la liste ne contenait que des traces d'argent; l'avant-dernier, dont la conductibilité était de 59,34 et qui avait été tiré des mines de Demidoff, en Russie, et le dernier, qui provenait des mines de Rio-Tinto, en Espagne, contenaient seuls de l'arsenic ; celui de Demidoff en renfermait des traces, celui de Rio-Tinto 2 p. 100.

On atteint aujourd'hui facilement des conductibilités de 90 à 95 p. 100, rapportées au cuivre pur.

Les instruments de mesure électrique sont disposés ordinairement de manière à donner la valeur d'une grandeur qui est l'inverse de la conductibilité et qu'on appelle *résistance électrique*[1]. On obtient la conductibilité C d'un fil de cuivre quelconque, par rapport à celle du cuivre pur, à laquelle on donne la valeur 100, en multipliant par 100 sa résistance calculée ρ et en divisant le produit par sa résistance réelle R, à la température de 0° centigrade.

$$C = \frac{100\ \rho}{R}$$

La résistance de 1 mètre de fil de cuivre pur, pesant 1 gramme, à la température de 0° centigrade, étant de 0,142 ohm légal[2], celle d'un fil de longueur l exprimée en mètres et de poids P exprimé en grammes sera

$$\rho = \frac{0{,}142 \times l^2}{P}$$

La conductibilité d'un fil de cuivre de l mètres de longueur, pesant P grammes et dont la résistance mesurée est de R ohms sera par suite à 0°

$$C = \frac{14{,}2 \times l^2}{P \times R}$$

On sait, d'après Becquerel, que la résistance électrique des métaux augmente lorsque leur température s'élève. Ces variations ont été mesurées, en 1862, par MM. Matthiessen et van Bosc qui, après de nombreuses expé-

[1] Sir W. Thomson a fait construire, depuis quelques années, des boîtes dans lesquelles les conducteurs peuvent être reliés facilement de différentes manières en arcs parallèles, de manière à permettre la mesure directe de la conductibilité des corps. Il a donné le nom de *mho*, inverse de *ohm*, à l'unité pratique de conductibilité, dans le système B. A.

[2] L'ohm légal vaut 1,0112 ohm ancien (unité B. A.); l'ohm ancien vaut 0,9889 ohm légal.

La résistance d'un mètre de fil de cuivre pur, pesant 1 gramme à la température de 0° C., est de 0,1415 ohm légal pour le cuivre recuit et de 0,1443 pour le cuivre écroui.

(Mascart et Joubert, *Leçons sur l'Electricité et le Magnétisme*, vol. II, p. 843.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

riences, ont reconnu que, la conductibilité d'un métal à 0° centigrade étant représentée par 100, la conductibilité C_t de ce métal, à la température t, pouvait être exprimée par une relation de la forme

$$C_t = 100 + \alpha t + \beta t^2$$

α et β étant des constantes positives ou négatives.

Dans le cas du cuivre [1]

$$C_t = 100 - 0{,}38701\ t + 0{,}0009009\ t^2$$

Les essais auxquels sont soumis les câbles sous-marins, en cours de fabrication, se faisant tous à la température de 24° centigrades (75° Fahrenheit [2]), on peut, dans la pratique, négliger le terme en t^2, et calculer la résistance R_t d'un fil de cuivre à la température t par la formule simplifiée

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

R_0 étant la résistance du fil à 0°. Les électriciens ont admis généralement, pour valeur de α entre 0 et 24° centigrades, le nombre 0,00388 qui résulte des expériences de MM. Matthiessen et van Bosc. La table ci-après qui permet de calculer facilement la résistance d'un conducteur en cuivre, à différentes températures, a été établie avec cette valeur pour α.

Nombre de degrés centigrades	colonne A	Nombre de degrés centigrades	colonne A	Nombre de degrés centigrades	colonne B	nombre de degrés centigrades	colonne B
0	1,0000	13	1,0504	0	1,0000	13	0,9520
1	1,0039	14	1,0543	1	0,9961	14	0,9485
2	1,0077	15	1,0582	2	0,9923	15	0,9450
3	1,0116	16	1,0621	3	0,9885	16	0,9415
4	1,0155	17	1,0679	4	0,9847	17	0,9381
5	1,0194	18	1,0698	5	0,9810	18	0,9348
6	1,0233	19	1,0737	6	0,9772	19	0,9314
7	1,0271	20	1,0776	7	0,9736	20	0,9280
8	1,0310	21	1,0815	8	0,9699	21	0,9246
9	1,0349	22	1,0854	9	0,9663	22	0,9213
10	1,0388	23	1,0892	10	0,9627	23	0,9181
11	1,0427	24	1,0931	11	0,9591	24	0,9131
12	1,0466			12	0,9553		
Pour passer d'une température inférieure à une température supérieure, multipliez la résistance par le nombre de la colonne A.				Pour réduire d'une température supérieure à une température inférieure, multipliez la résistance par le nombre de la colonne B.			

D'après M. Benoit [3], qui a étudié l'accroissement de résistance d'un grand

[1] *Annales de Poggendorff*, loc. cit.
[2] La correspondance exacte des deux échelles thermométriques serait 23°,88.
[3] *Comptes rendus*, loc. cit.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nombre de métaux jusqu'à des températures très élevées, la résistance *spécifique* R_t du cuivre, c'est-à-dire la résistance ramenée aux unités de longueur et de section, à une température t, est exprimée en fonction de sa résistance R_0 à la température 0 par la formule :

$$R_t = R_0 (1 + 0{,}003637\ t + 0{,}000000587\ t^2)$$

L'accroissement de résistance, par chaque degré de température, serait conséquemment un peu plus faible que ne l'admettaient MM. Matthiessen et van Bosc, et la résistance initiale du cuivre ne serait doublée que vers 255°.

MM. Cailletet et Bouty ont également fait, en 1885, de nombreuses expériences sur la résistance électrique des métaux, mais à de basses températures, pouvant descendre jusqu'à — 122°,82 centigrades. La valeur qu'ils ont trouvée pour le coefficient α, dans le cas du cuivre, est un peu plus forte que celle indiquée par les précédents expérimentateurs et égale à 0,00418, entre les températures 0° et — 58°,22 centigrades.

Enfin, M. Wroblewski, qui a mesuré la résistance du cuivre à des températures comprises entre + 100° et — 201° C. a obtenu pour α, entre 0° et + 23°, des nombres dont la moyenne, dans deux séries d'essais, est 0,004096, résultat très voisin de celui indiqué par MM. Cailletet et Bouty. La résistance électrique du cuivre, d'après les expériences de M. Wroblewski, paraît s'approcher de zéro, à une température qui n'est pas très éloignée de celle que l'on obtient en évaporant l'azote liquide dans le vide.

On a proposé récemment de remplacer le cuivre par le bronze silicieux, qui a une conductibilité peu différente de celle du cuivre du commerce et une résistance à la rupture beaucoup plus grande. L'armature en fer pourrait ainsi être allégée, d'où résulteraient à la fois une économie dans le prix de revient des câbles et de plus grandes facilités pour la pose et les réparations [1].

FORME DU CONDUCTEUR

Les conducteurs des premiers câbles sous-marins étaient constitués par un fil cylindrique, plein, de 1,65 millimètre de diamètre. Cette forme, qui était

[1] M. Vivarez, prenant pour base les poids de métal conducteur et de gutta-percha qui forment l'âme du câble atlantique français, a établi la spécification suivante pour un câble de mer profonde dans la constitution duquel entrerait le bronze silicieux.

Bronze silicieux	220	kilogrammes
Gutta-percha	180	—
Jute	80	—
28 fils de fer de 1,25 millimètre de diamètre	500	—
Chanvre et composition bitumineuse	250	—
Poids total dans l'air	1,250	kilogrammes

Ce câble, qui aurait un diamètre de 25 millimètres, pèserait 320 kilogrammes dans l'eau et ré-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la plus simple, était en même temps la plus rationnelle et la plus économique, puisqu'elle présentait, sous un même volume, la plus petite surface. A poids égal de cuivre, on diminuait donc à la fois le poids de matière isolante à appliquer sur le conducteur et la capacité électrostatique du câble : la dépense était moindre et, comme la vitesse de transmission des signaux varie en raison inverse de cette capacité, le rendement commercial du câble se trouvait augmenté. Ces avantages étaient contrebalancés toutefois par divers inconvénients qui ont fait abandonner, dès 1856, le fil conducteur plein pour le remplacer par un toron de plusieurs fils plus fins. Les fils n'étant pas, en effet, tirés d'une masse de métal parfaitement homogène, peuvent non seulement être plus ou moins cassants par places, mais contenir des défauts ou des parcelles de matières étrangères qui augmentent la résistance du fil et en amènent rapidement la destruction en ces points. Une soudure peut aussi venir accidentellement à manquer ; et, dans chacun de ces cas, la rupture du conducteur entraîne la cessation complète des communications. Sur un toron de plusieurs fils, les soudures sont espacées à des intervalles convenables, et il n'y a aucune chance pour que des défauts susceptibles d'amener une interruption se rencontrent exactement au même point sur tous les fils : la rupture fortuite, en divers points, de tous les fils même du toron ne peut conséquemment amener la destruction complète du câble. On a reproché cependant aux torons de produire, lorsque l'un des petits fils qui le composent vient à se briser, des pointes extrêmement fines susceptibles de percer l'enveloppe isolante, bien plus facilement qu'un fil de gros diamètre. Les différents fils d'un toron n'étant en outre pas jointifs, laissent passer l'eau tout le long du conducteur, lorsqu'elle peut pénétrer accidentellement en un seul de ses points : la réparation d'une perte pourrait entraîner ainsi le relevage et le remplacement d'une longueur considérable de câble. On a évité ce dernier inconvénient en recouvrant, durant le câblage du conducteur, le fil central d'une petite couche de composition Chatterton dans laquelle viennent se mouler les fils qui sont cordés autour du premier : l'excès de cette matière filtre à travers les intervalles des fils du toron et se lie plus tard à la première couche de l'enveloppe isolante d'une manière si intime que, même sous une pression de 57 à 60 atmosphères, l'eau n'a jamais pénétré au delà de quelques centimètres le long du conducteur, dans les câbles fabriqués de cette manière.

MM. L. Clark et Ch. Bright, dans la construction du câble du golfe Persique, avaient cherché, ainsi qu'on l'a vu plus haut, à réunir les avantages du fil à section circulaire, avec ceux d'un toron, en formant le conducteur

sisterait à une traction de 2800 kilogrammes, dont la moitié serait supportée par le conducteur. Sa résistance à une rupture serait donc représentée par le poids de 8 à 9 milles marins du câble suspendu verticalement dans l'eau. (*Zeitschrift für Elektrotechnik*, 1885.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de quatre parties segmentaires tirées à travers un tube de cuivre et qui représentaient ainsi un fil cylindrique à section circulaire ; mais, ils durent renoncer à leur idée en raison des difficultés de fabrication d'un semblable conducteur.

Aussi le toron est-il devenu depuis lors d'un usage universel dans la construction des câbles sous-marins. Il comprend quelquefois trois fils, le plus souvent sept, dont un au centre autour duquel sont cordés les six autres. Le conducteur du câble direct des États-Unis a été formé, en 1874, par MM. Siemens frères, d'un gros fil central de 2,3 millimètres de diamètre, entouré de onze fils plus petits de 0,9 millimètre. Si l'on considère (fig. 33), une section de ce conducteur, on voit qu'une aire donnée de cuivre est ainsi renfermée dans un cercle plus petit que si l'on eût employé un toron de fils tous de même diamètre, et la capacité électrostatique de la ligne, pour un diamètre donné de l'âme, se trouve donc diminuée ; d'un autre côté, avec les mêmes diamètres de l'âme et du conducteur, le poids de cuivre est plus grand et, par suite, la conductibilité se trouve augmentée. Le gain, à ce dernier point de vue, serait de 10 p. 100, d'après M. Siemens : l'influence sur la vitesse de transmission à travers le câble n'a pu être exprimée en chiffres, mais paraît très sensible.

FIG. 33.

Lorsque l'enveloppe isolante d'un câble immergé a, en un point, une légère fissure, le courant positif, en passant du conducteur en cuivre à la mer, décompose l'eau et les sels qu'elle renferme et détermine la formation de chlorure de cuivre qui est soluble et se dissout dans l'eau, au fur et à mesure de sa production. L'envoi du courant négatif dans le conducteur a pour effet d'attirer sur le cuivre, en contact avec l'eau de mer, les éléments électro-positifs de celle-ci, hydrogène, sodium, etc.; les matières terreuses qui peuvent se trouver à la surface du conducteur sont d'abord réduites, puis l'hydrogène libre se dégage en bulles, en élargissant les parois de la cavité de laquelle le gaz s'échappe. Dans l'un et l'autre cas, la faute est aggravée. La succession rapide des signaux sur les longues lignes sous-marines, exigeant l'émission de courants alternés, les effets des deux courants s'ajoutent et la destruction du câble en est d'autant plus rapide.

Pour remédier à cet inconvénient, M. Varley a proposé d'introduire un fil fin de platine dans le toron de cuivre pour maintenir la continuité du conducteur lorsque le cuivre vient à être rongé.

Au point de vue de la capacité électrostatique, on considère un toron comme équivalent à un fil plein à section circulaire, dont le diamètre serait celui de la circonférence circonscrite au toron, diminué de 5 p. 100.

La vitesse de transmission des signaux à travers un câble étant directement proportionnelle au poids du conducteur, il y a intérêt, sur les longues lignes sous-marines, à augmenter ce poids le plus possible. Dans les derniers

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

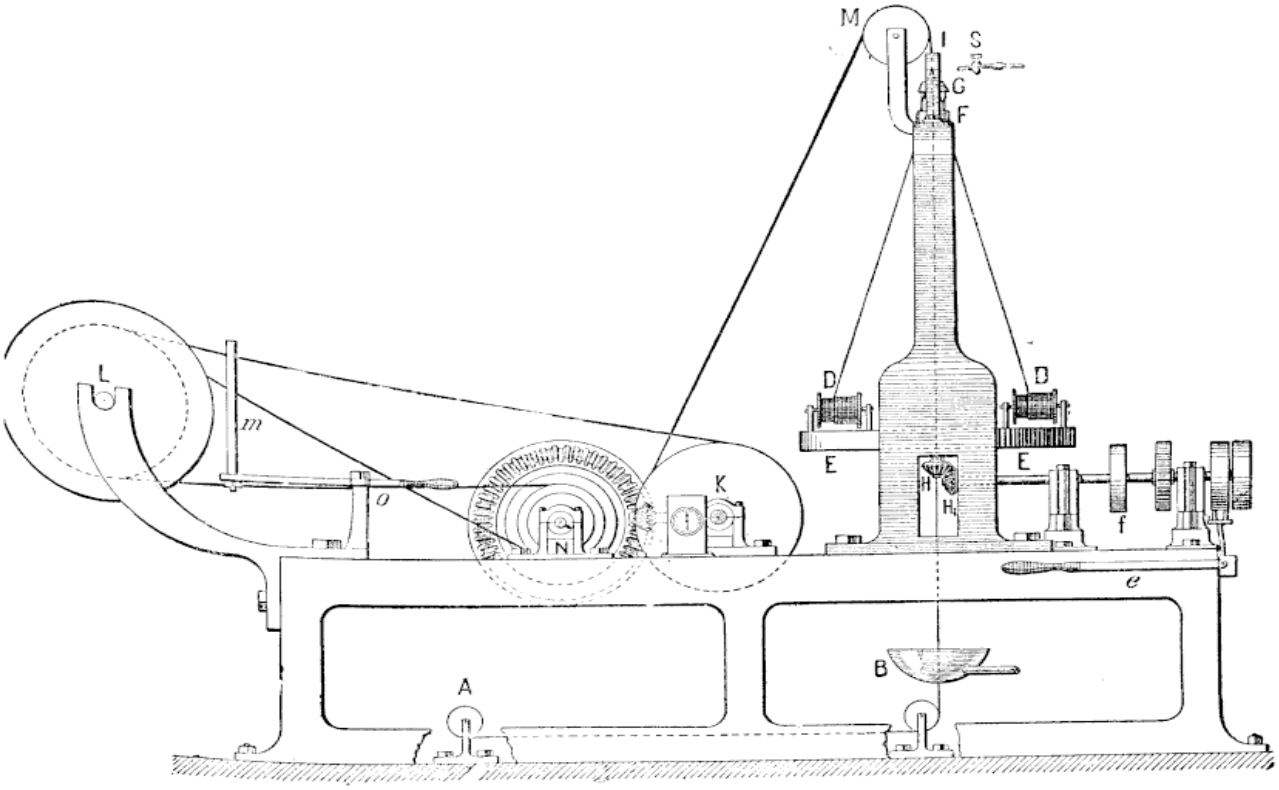


Fig. 34.

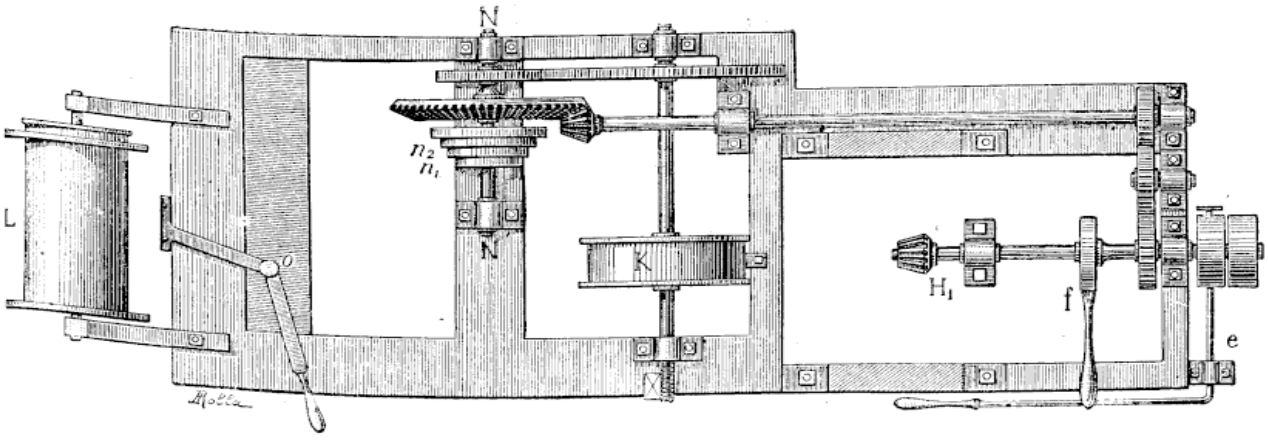


Fig. 35.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

câbles atlantiques posés, le poids de cuivre varie de 160 à 180 kilogrammes par mille marin, et, exceptionnellement, a même dépassé 200 kilogrammes.

FABRICATION DU CONDUCTEUR

La fabrication du conducteur en cuivre s'effectue à l'aide d'une machine analogue aux machines à corder.

Elle est représentée en élévation et en plan par les figures 34, 35 et 36.

Le fil destiné à former l'axe du toron est enroulé sur une bobine A placée sous le bâti de la machine, passe sous une poulie de renvoi qui lui donne une direction verticale, et traverse, de bas en haut, un vase B, chauffé à la vapeur, et contenant de la composition Chatterton fondue. Il entraîne à sa surface une petite quantité de cette matière, suit l'axe d'un arbre vertical creux C à la sortie duquel les autres brins viennent s'appliquer sur lui.

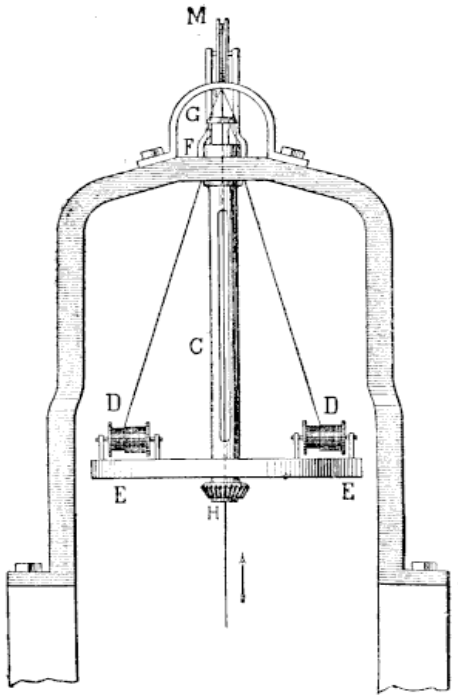


FIG. 36.

Ceux-ci sont enroulés sur des bobines D, portées par un plateau horizontal E qui tourne avec l'axe C : ils se rendent directement à deux filières F et G placées à l'extrémité supérieure de l'axe vertical et composées de deux cylindres aplatis qui sont percés de trous en nombre égal à celui des bobines D.

Les trous des deux filières ont une légère courbure hélicoïdale qui prépare les brins à prendre leur forme définitive. L'axe C recevant, par l'intermédiaire de deux pignons d'angle H, H_1, un mouvement de rotation sur lui-même, fait tourner le plateau E ; le fil central se trouvant, de son côté, entraîné avec la tresse déjà fabriquée, les fils des bobines D, au sortir de la seconde filière, s'appliquent en spires plus ou moins allongées sur le fil central. Un jet de gaz enflammé S chauffe sans cesse le point de réunion des divers brins, afin de ramollir la composition Chatterton, et de permettre aux fils

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

extérieurs de s'y incruster parfaitement. Le toron ainsi formé traverse le guide I, passe sur la poulie de renvoi M, gagne le tambour K sur lequel il fait plusieurs tours et enfin s'enroule sur la bobine L, guidé par une fourchette verticale *m* que l'on peut faire tourner autour de son axe *o*. On diminue la vitesse de rotation de la bobine L, au fur et à mesure que la quantité de fil déjà enroulée augmente, en faisant passer successivement la courroie qui lui transmet le mouvement sur les poulies à diamètre croissant n_1, n_2..., calées sur l'axe N. Le frein *f* permet d'arrêter rapidement la machine, en cas de besoin, après que la fourchette d'embrayage *e* a été manœuvrée.

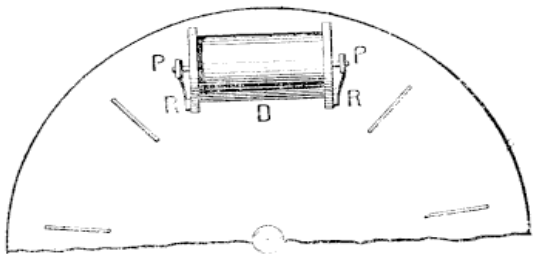


FIG. 37.

Les figures 37 et 38 montrent les détails de la suspension des bobines D : un ressort P R dont une extrémité P est fixée au support de chaque bobine, frotte par son autre extrémité R sur la joue de la bobine, de manière à l'empêcher de tourner trop rapidement et à maintenir les fils de cuivre toujours convenablement tendus.

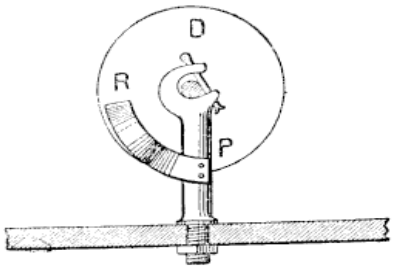


FIG. 38.

Afin de pouvoir faire varier la distance des deux supports d'une bobine avec la longueur de son axe, ces supports sont mobiles dans des rainures pratiquées suivant des rayons du plateau. Un écrou permet de fixer chacun d'eux dans la position convenable.

L'extrémité de l'axe du tambour K (fig. 34 et 35) est filetée et engrène avec la première roue d'un compteur qui enregistre la longueur de cordelette tressée.

Les torons destinés à la fabrication des âmes des câbles se fabriquent généralement par pièces de 2 milles marins environ de longueur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE II

ENVELOPPE ISOLANTE

§ 1er Gutta-percha. — Production. — Propriétés physiques et chimiques. — Fabrication, épuration, machines à recouvrir de gutta-percha, composition Chatterton. — Gutta-percha perfectionnée de W. Smith.
§ 2. Caoutchouc. — Production. — Propriétés physiques et chimiques. — Vulcanisation. — Épuration et modes d'application sur les conducteurs. — Caoutchouc Hooper. — Altérations.
§ 3. Autres isolants. — Composition Wray, paraffine, ozokérite, nigrite, kérite, caoutchouc de M. Bruce Warren. — Câbles Berthoud-Borel. Câbles Brooks. Câbles Fortin-Hermann.

La gutta-percha et le caoutchouc, avec quelques produits dont ces substances forment la base essentielle, sont les seules matières qui ont été employées jusqu'à ce jour pour former l'enveloppe isolante des câbles sous-marins.

§ 1er — GUTTA-PERCHA

PRODUCTION

La gutta-percha est un suc laiteux, solidifié, qui s'écoule de certains arbres appartenant à la famille des *sapotacées* lorsqu'on incise leur écorce. Les premiers échantillons de gutta, introduits en Europe, furent présentés à la *Société royale asiatique* par José d'Almeida, au mois d'avril 1843 [1] : ils comprenaient une cravache de cheval et quelques morceaux de cette substance à l'état brut. Le docteur Montgomery, au cours d'un voyage dans l'Extrême-Orient, avait, de son côté, remarqué la nature particulière des manches d'outils dont se servaient les naturels des îles de la Sonde et avait été frappé de la facilité avec laquelle ceux-ci les obtenaient : la matière, plongée dans l'eau chaude, se ramollissait, devenait assez plastique pour

[1] *Journal of the Society of Arts*, 1880, Thomas Bolas, *Cantor lectures*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

prendre par le moulage toutes espèces de formes, et durcissait de nouveau par le refroidissement. Le docteur Montgomery en rapporta quelques spécimens qu'il montra à la *Société des Arts* de Londres, vers la fin de la même année 1843.

Le nouveau produit attira immédiatement l'attention de Charles Hancock, qui possédait une manufacture importante de caoutchouc ; il lui appliqua les procédés d'épuration de cette substance et chercha à l'utiliser dans l'industrie. Mais c'est au docteur Werner Siemens que revient l'honneur d'avoir trouvé le moyen pratique de recouvrir de gutta les fils métalliques et d'en avoir fait la première grande application en télégraphie, lors de la construction du réseau télégraphique souterrain en Prusse, en 1846.

En 1848, un voyageur anglais trouva, dans l'île de Singapore, l'arbre qui produisait la gutta-percha : il en envoya des branches portant des feuilles et des fleurs à sir Willam J. Hooker, qui décrivit la plante et lui donna le nom d'*isonandra gutta*.

La consommation toujours croissante de la gutta-percha ayant rendu rapidement insuffisante la production de l'île de Singapore, on dut rechercher les guttifères dans les autres îles de l'archipel de la Sonde. On trouva à Sumatra, dans la partie septentrionale de l'île de Bornéo, et dans la presqu'île de Malacca, des arbres très voisins de l'*isonandra gutta hookerii* et qui, par l'incision de leur écorce, laissent échapper un suc laiteux plus ou moins semblable à la gutta de Singapore. Tous ces produits se répandirent rapidement dans le commerce; mais, par suite de la grande variété des espèces, d'apparences souvent très semblables, et de la diversité des idiomes des indigènes, des gommes très différentes au point de vue de leurs propriétés électriques parurent sous le même nom dans les marchés ; inversement, les mêmes arbres étaient désignés par des noms différents dans diverses localités et quelquefois dans la même forêt. Les mélanges opérés par les naturels de ces pays, entre des produits de qualités différentes, sont encore venus augmenter la confusion, et il n'est pas rare de constater que deux guttas, portant le même nom et provenant de la même localité, sont de qualités absolument différentes. La classification botanique des guttifères n'a d'ailleurs jamais pu être faite avec précision, par suite de la difficulté que l'on éprouve à s'en procurer des spécimens complets dans toutes leurs parties : il y a peu d'années encore, il n'existait pas en Europe un seul herbier possédant un échantillon botanique complet des producteurs de la gutta-percha. Ces arbres ne fleurissent tout au plus qu'une fois par an, sans porter à la fois leurs fleurs et leurs fruits, et, par suite de la hauteur considérable des arbres et de la petitesse de leurs produits, l'œil ne peut, d'en bas, en constater la présence que très difficilement. Les arbres à gutta n'entrent d'ailleurs en floraison qu'après être arrivés à une croissance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

complète, à un âge conséquemment assez avancé (trente ans environ). Or, l'exploitation en a été faite avec un tel vandalisme, qu'il est très rare aujourd'hui d'en trouver dans les forêts un sujet adulte, et les chercheurs de Sumatra eux-mêmes ne connaissent ni les fleurs, ni les graines de ces arbres.

Les travaux de MM. les Drs Beauvisage et W. Burck et un voyage d'exploration de ce dernier sur les plateaux de Padang, dans l'île de Sumatra, permettent cependant de distinguer aujourd'hui assez nettement dix à douze espèces d'arbres à gutta-percha dont quelques-unes fournissent un suc excellent. Ces espèces sont [1], en les classant d'après la qualité de leurs produits :

En premier lieu, le *palaquium oblongifolium* appelé par les indigènes

njatoch balam tembaga
njatoch balam sirah
njatoch balam merah
njatoch balam doerian, *etc.*

(le nom de *njatoch balam*, ou celui même simplement de *njatoch*, désigne en général l'arbre au suc laiteux, sans indiquer une espèce déterminée, de même que le suc laiteux figé est appelé *getah balam* ou simplement *getah* [2]. Le *njatoch balam tembaga* se trouve à Sumatra, Bornéo et Malacca, dans les forêts vierges toujours humides où le sol est riche en humus et sur des terrains en pente ; il atteint 20 à 22 mètres de hauteur et est caractérisé par ses feuilles, à forme régulièrement oblongue, terminées au sommet en une longue pointe aiguë et dont les plus grandes ont jusqu'à 22 centimètres de longueur sur 75 millimètres de largeur (fig. 39).

Le *njatoch balam tembaga* fournit la meilleure de toutes les sortes de guttas-perchas : c'est elle qui est connue dans le commerce sous les noms de *gutta-merah*, *gutta-taban*, *gutta-taban-merah*, *gutta-derrian*. Le suc, d'un blanc laiteux, comme dans toutes les sortes de guttas lorsqu'il coule de l'arbre, prend une couleur brune due au mélange des parties corticales et ligneuses qui, par la cuisson et l'épuration de la gutta, communiquent leur matière tinctoriale au suc figé. La *gutta taban* ou *derrian*, bien purifiée, est très élastique et peut se plier facilement sans se rompre ; plongée dans l'eau chaude, elle se pétrit, prend toutes les formes sans devenir gluante, et reprend, en se refroidissant, sa solidité ordinaire [3].

[1] Rapport du Dr W. Burck, directeur adjoint du jardin botanique de Buitenzorg, sur son exploration dans les Padangsche Bovenlanden, à la recherche des espèces d'arbres qui produisent la gutta-percha. Publié à Saïgon, 1885.

[2] Le mot *percha* vient du nom de *poulo-pertja* par lequel les indigènes désignent l'île de Sumatra.

[3] La *gutta-batou* signalée par M. Seligmann-Lui, à la suite de son voyage dans l'archipel indien, en 1882, paraît provenir du *palaquium calophyllum Pierre* (Bornéo), variété de l'espèce *palaquium oblongifolium*. Cette gutta, de couleur plus claire et plus rouge que la gutta-taban, qui seule lui est supérieure, est un peu plus rigide que celle-ci et a un tissu moins fin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Le *payena leerii* ou *njatoeh balam bringin*, appelé aussi *njatoeh balam sœndai*, *njatœh balam pipit*, *kœlan*, *balam tandoek*, etc., se trouve à Sumatra, Banka, Malacca et peut-être à Riouw. Il porte des feuilles alternes ovales, à base aiguë (fig. 40), et des fleurs blanches ; dans tous ses tissus on

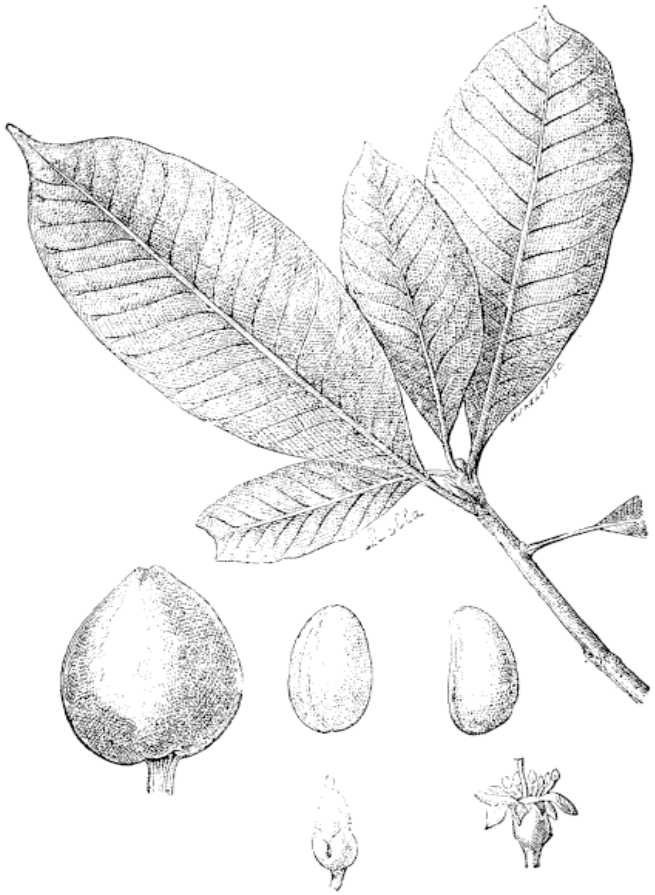


Fig. 39.

trouve une matière qui noircit par les alcalis. Il atteint des hauteurs de 30 mètres et arrive à l'état adulte plus rapidement que l'espèce précédente. La gutta qu'il donne, *gutta balam bringin*, ou *gueutta seundek*, ou *balam pipit* ou *kœlan*, est la seconde comme qualité. Le suc laiteux est très liquide et peut être recueilli sans mélange de parcelles d'écorce ; la gutta solidifiée et purifiée est conséquemment plus blanche que la gutta-taban. La gueutta seundek est compacte, plastique lorsqu'elle est ramollie, et reprend, en se refroidissant, sa solidité première ; mais elle est moins homogène que la précédente et se convertit facilement en fibres et filaments.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° Le *palaquium gutta*, ancien *isonandra gutta hookerii* de Singapore, qui avait été regardé comme l'arbre à gutta par excellence, ne se rencontre plus, l'exploitation effrénée à laquelle les indigènes se sont livrés pendant plusieurs années en ayant fait disparaître entièrement l'espèce, depuis long-

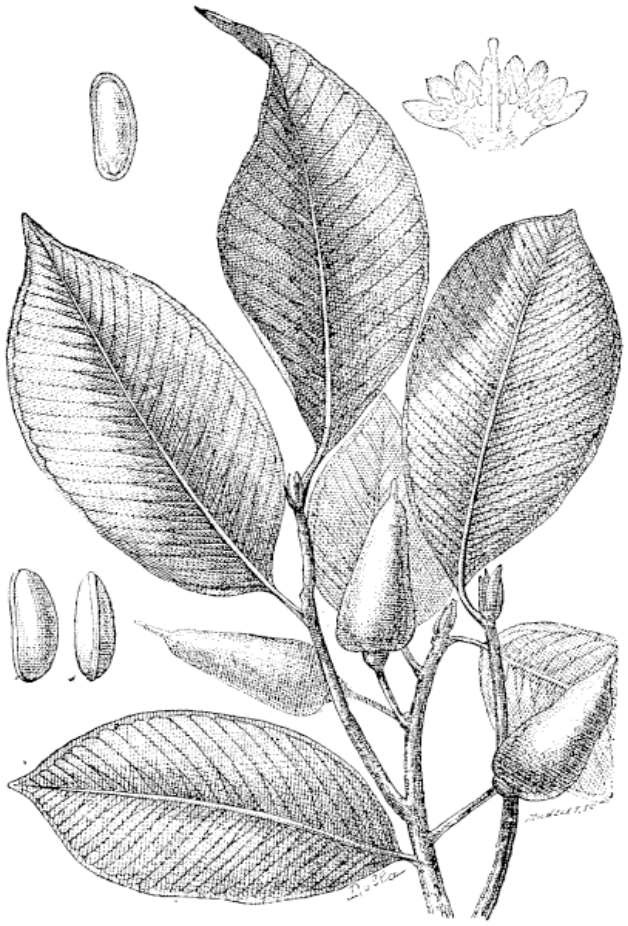


Fig. 10.

temps, des forêts de cette île. Deux échantillons toutefois en avaient été transportés, il y a une trentaine d'années, de Singapore au jardin botanique de Buitenzorg (Java) et ont fourni récemment des graines.

4° Le *palaquium borneense* de Pontianak, dont les produits se rapprochent de ceux du *palaquium oblongifolium* et *palaquium gutta*.

5° Le *palaquium treubii*, de Bangka, qui a plus de rapport avec le *payena leerii*.

Les autres guttifères, dont les caractères sont suffisamment déterminés, tels que le *njatoeh balam tembaga de soepayang* et le *njatoeh balam doerian*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de soepayang ne produisent que des guttas de qualités inférieures, gluantes lorsqu'elles sont échauffées et se laissant entamer avec l'ongle, lorsqu'elles sont refroidies,

Les arbres à gutta ne se trouvent plus aujourd'hui que dans les parties les plus épaisses des forêts vierges, où les chercheurs de guttas savent les découvrir avec une adresse merveilleuse. Ils en déterminent l'espèce à la couleur du tronc, à l'épaisseur de l'écorce, au plus ou moins de dureté du bois ; au besoin, ils en font couler, à l'aide d'une incision pratiquée dans l'écorce, le suc laiteux dont ils apprécient la qualité entre leurs doigts. Si les résultats de cet examen paraissent satisfaisants, l'arbre est abattu à coups de hache et dépouillé quelquefois de sa cime pour empêcher le suc de se répandre dans les branches et les feuilles : des incisions demi-circulaires sont pratiquées ensuite à la hachette dans l'écorce, sur la moitié supérieure de l'arbre, depuis sa base jusqu'à sa cime, à des intervalles de 30 à 50 centimètres. Faute de bras, l'arbre ne peut être retourné et toute la partie inférieure touchant la terre reste intacte et se trouve perdue. Le suc laiteux s'écoule par ces rainures et, suivant les espèces (le njatoeh balam bringin par exemple), s'y fige immédiatement, ou s'écoule et tombe dans de grandes feuilles de bananiers que l'on dispose à terre pour le recevoir. L'insouciance des indigènes est encore telle qu'ils ne mettent généralement ces feuilles en place que lorsque tout le travail de décortication est terminé, perdant ainsi tout le suc qui s'écoule de l'arbre pendant ce temps. L'écoulement dure généralement plusieurs jours, pendant lesquels le suc laiteux est sali par de la terre, des feuilles sèches, des insectes et des débris de toutes sortes qui y tombent.

A chaque visite à un arbre en exploitation, le suc qui ne s'est pas naturellement figé est agité avec une baguette, puis pétri à la main, de manière à former une petite masse solide. Tous les produits récoltés dans la journée, et provenant ou non des mêmes espèces d'arbres, sont nettoyés grossièrement et jetés dans une bassine remplie d'eau chaude. La gutta devenue molle est étendue sur une planche de bois dur, bien pétrie de manière à assurer le mélange intime des parties de qualités différentes, et réduite en une feuille aussi mince que possible; dans cet état, on la débarrasse, soit à la main, soit par un lavage à l'eau froide, des matières ligneuses qui sont éparses à sa surface. La gutta épurée deux fois comme nous venons de l'indiquer acquiert une plus grande valeur marchande et forme ce qu'on appelle la gutta n° 1. Pendant qu'elle est encore plastique, on la débite en morceaux de formes et de grandeurs variables, et c'est dans cet état qu'elle est portée sur les places d'échanges.

Durant sa cuisson, la gutta, qui, au moment où elle s'échappe de l'arbre, est toujours blanche, prend une teinte brune ou violacée plus ou moins fon-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cée, due à la matière tinctoriale qui est contenue dans les parcelles ligneuses avec lesquelles le suc est mélangé.

La quantité de gutta fournie par un njatoeh balam dépend de la nature de cet arbre et de son âge. On peut évaluer à un *katti* [1] le poids de suc laiteux bien épuré que peut donner un njatoeh balam tembaga adulte, c'est-à-dire âgé de vingt-cinq à trente ans, et ayant 1,25 mètre de circonférence à la base et à 2/5 de katti le poids de suc que l'on peut obtenir d'un arbre de la même espèce ayant 60 centimètres de circonférence à hauteur d'homme. L'île de Bornéo ayant livré au commerce, en 1881, environ 21000 piculs de gutta, le Dr W. Burck estime à 5 250 000 le nombre des arbres qui ont dû y être abattus. En tenant compte des dégâts que leur chute occasionne dans des forêts où la végétation est très touffue, il arrive à évaluer à 26 000 000 le nombre total des guttifères qui sont détruits dans cette île chaque année par les chercheurs de gutta. Plus de 60 000 piculs de cette gomme ayant été exportés, en 1881, par le port de Singapore, qui en est le grand entrepôt [2], on peut juger des ravages qu'a produits en quelques années une exploitation faite sans ménagement dans les forêts de la zone si limitée qu'habitent les arbres à gutta (carte [3], fig. 41).

Aussi des craintes se sont manifestées, à diverses reprises et depuis nombre d'années, au sujet de la disparition progressive des guttifères. Le gouvernement hollandais, désireux de conserver à ses colonies indiennes ce précieux produit d'exportation, a fait faire au jardin botanique de Buitenzorg (Java) des essais de plantation des meilleures espèces d'arbres à gutta, dans le but d'en propager ensuite la culture parmi les colons. D'importants résultats ont déjà été obtenus et, en 1886, 4 000 plantules étaient cultivées en plein champ. Des essais y sont entrepris, en outre, dans le but d'établir la comparaison entre la quantité de gutta que l'on obtiendrait à l'aide d'incisions modérées répétées chaque année sur des arbres laissés debout, et celle que donne le mode actuel par l'abatage des arbres : le produit paraît devoir doubler, si l'exploitation en est faite suivant une méthode rationnelle.

Le gouvernement français a, de son côté, tenté récemment d'introduire la culture des arbres à gutta dans la Cochinchine française.

On peut espérer que tant d'efforts ne resteront pas inutiles et que l'industrie électrique ne se verra pas privée d'un produit que les progrès de la science lui rendent tous les jours plus nécessaire.

[1] 100 kattis = 1 picul = 62 kilog. 500.

[2] Les prix de la gutta-percha, nécessairement très variables, étaient, en 1883, sur le marché de Singapore, de 80 à 105 dollars le picul pour la première qualité, de 35 à 82 dollars pour la qualité intermédiaire, et de 18 à 40 dollars pour la qualité dite *blanche*.

[3] Cette carte est extraite des documents publiés par M. Seligmann-Lui, sur les *Origines de la gutta-percha* (*Annales télégraphiques*, 1883).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Gravé par E. Moreau, 45 r. Vavin Paris.

FIG. 41.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. Ed. Heckel [1] a, d'un autre côté, trouvé dans le *butyrospermum parkii kotschy* un latex qui s'écoule de la tige et des rameaux par incisions et qui, sans être identique à la gutta-percha au point de vue chimique, paraît en posséder les propriétés physiques principales. Cet arbre, très répandu dans les forêts qui bordent le Niger sur son immense parcours et dans toute la zone équatoriale du Nil, semblerait donc pouvoir remplacer, au moins dans une certaine mesure, les palaquium et les dichopsis. Quelques applications industrielles de la gutta *bassia parkii* ont déjà été tentées ; il resterait à étudier cette substance d'une manière plus complète, au point de vue de son emploi dans la fabrication des câbles sous-marins, et à se rendre compte des difficultés et du prix de revient de son extraction.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

La gutta-percha *pure* est une substance poreuse, couleur blanc de lait, insoluble dans l'eau, l'alcool, les alcalis et les acides étendus, très soluble, surtout à chaud, dans l'éther, la benzine, le chloroforme, la térébenthine, le naphte, la créosote, et en général toutes les résines. L'acide sulfurique concentré l'attaque, surtout sous l'influence d'une chaleur modérée et ne laisse bientôt, à la place de la gutta, qu'une matière charbonneuse ; l'acide azotique concentré la change en une résine jaune. Identique, quant à sa composition chimique, à l'huile de térébenthine C^{20} H^{30}, elle contient :

Carbone	88,88	100,00
Hydrogène	11,12	

Sous l'action de l'oxygène de l'air, elle brunit, devient cassante, et se transforme en une résine soluble dans l'alcool. L'oxydation est facilitée par la lumière, la chaleur et surtout les alternatives de sécheresse et d'humidité ; elle s'accélère sous l'influence combinée de ces diverses causes.

La gutta-percha du commerce n'est pas un principe végétal immédiat, mais un mélange, en proportions variables, de gutta pure, de résine provenant de son oxydation, d'eau et de matières ligneuses végétales. D'après le Dr Miller, une bonne gutta du commerce a la composition suivante :

Gutta pure	79,70
Résine	15,10
Matières ligneuses	2,18
Eau.	2,50
Cendres.	0,52
	100,00

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1885.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sa densité est généralement d'environ 0,981. La meilleure gutta est jaunâtre et fibreuse ; les autres sont rougeâtres ou blanchâtres. Solide à la température ordinaire, la gutta se rompt sous une charge de 2,450 kilogrammes par millimètre carré, en s'allongeant de 50 à 60 p. 100 : elle peut être pliée, nouée et tirée sans inconvénient, mais se laisse entamer facilement par une pointe ou un instrument tranchant. Elle se ramollit vers 37° : aussi un câble en gutta-percha, dont la fabrication est terminée, ne doit plus être soumis à une température supérieure à 32 ou 33°. Entre 50 et 60°, elle devient plastique ; appliquée dans cet état sur un objet dont on veut prendre le moule, elle en épouse très exactement toutes les formes, quelque délicates qu'elles soient, et les conserve après le refroidissement. Vers 100° elle entre en fusion et se résinifie, au contact de l'air, en absorbant un quart de son poids d'oxygène.

Une gutta est d'autant meilleure qu'elle contient moins de résine. Les qualités les plus estimées sont celles dites de Java et de Macassar ; viennent ensuite les Sumatra et, en dernier lieu, celles de Bornéo. Certaines guttas, blanchâtres et visqueuses, provenant de Bornéo, contiennent un lait qui fermente en dégageant successivement de l'acide butyrique et du butyrate d'amyle : à la longue, elles ne laissent qu'une matière résineuse, pulvérulente.

Le seul procédé connu jusqu'à ce jour pour prévenir l'oxydation de la gutta-percha consiste à placer cette substance dans l'eau : pratiquement, elle y est indestructible et il n'existe pas un seul exemple d'un câble sous-marin dont la gutta, dans la partie immergée, ait eu à souffrir de l'action de l'oxygène. Aussi certaines compagnies n'ont-elles pas hésité à enfermer, dans les pays chauds, les lignes souterraines faisant suite aux câbles sous-marins dans des conduites qui sont remplies d'eau en permanence, à l'aide de réservoirs placés sur les points culminants du terrain. Dans des conduites sèches, où le câble est en contact avec l'air, la gutta finit par se rétrécir et devenir friable, en laissant le conducteur en cuivre à découvert.

M. Edwin Clark avait reconnu, en 1852 déjà, que dans le travail d'épuration auquel il est nécessaire de soumettre la gutta, celle-ci s'unit mécaniquement à une certaine quantité d'eau qui, sous l'influence des variations de température auxquelles la matière est soumise pendant le travail même, s'évapore partiellement en laissant à sa place une résine plus ou moins poreuse. Une bonne gutta tirée d'un morceau de câble récemment fabriqué, analysée par le Dr Miller, en 1860, contenait 15 p. 100 de résine et 2,5 p. 100 d'eau. Bien que les procédés d'épuration de la gutta aient été beaucoup perfectionnés depuis lors, il semble résulter d'expériences faites par le professeur Abel, en 1876, qu'au point de vue des produits oxydés formés aux dépens de la gutta-percha et de l'eau interposée, on n'ait réalisé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aucune amélioration. Une feuille de gutta, de qualité extra-supérieure, lui donna, en effet, 12,7 p. 100 de résine et 5 p. 100 d'eau : ces proportions variaient respectivement entre 20 et 27,5 et entre 3 et 13 dans sept autres échantillons qu'il examina. En les classant ensuite, d'après leurs valeurs commerciales, il reconnut qu'il n'existait aucune relation directe entre ces valeurs et les proportions de résine et d'eau contenues dans les guttas soumises aux essais. L'analyse de guttas de qualités supérieures, exposées pendant plusieurs années à l'air et à la lumière, lui démontra en outre que l'oxydation, sous l'influence de ces deux causes, ne se poursuit plus qu'avec lenteur, lorsque, par une mastication prolongée, la gutta est devenue suffisamment compacte; la proportion d'eau interposée permet de se rendre compte, au moins approximativement, de l'état auquel est arrivée la gomme à cet égard.

Les quantités d'eau de mer et d'eau douce qu'absorbe la gutta-percha à la température ordinaire sont entre elles dans le rapport des nombres 3 et 5. Pour l'eau de mer, le pouvoir absorbant de la gutta devient deux fois plus considérable lorsque la température s'élève de 4° à + 49° : la progression est un peu plus rapide pour l'eau douce. La pression n'a pas d'influence sensible sur cette propriété. L'eau d'absorption ne paraît pénétrer dans les pores de la gutta que jusqu'à une certaine profondeur, très faible d'ailleurs; au delà de cette limite, le poids d'eau n'augmente plus, quelle que soit l'épaisseur de la gutta. L'eau interposée mécaniquement dans les pores de cette substance n'altère pas ses qualités électriques, lorsqu'elle ne dépasse pas 2 ou 3 p. 100 du poids de la gomme.

Le pouvoir isolant de la gutta-percha, ou la résistance que cette matière offre au passage du courant électrique, mesuré relativement au cuivre pris pour unité, est, toutes dimensions égales, à la température de 24° C., approximativement de

$$60\,000\,000\,000\,000\,000\,000 \quad \text{ou} \quad 6 \times 10^{19}$$

On peut se faire une idée de l'énormité de ce nombre en remarquant que la lumière dont la vitesse est d'environ 77 000 lieues par seconde, mettrait plus de six mille ans à franchir la distance que le même nombre exprimerait en mètres.

Les différentes guttas naturelles ayant des propriétés très diverses, les fabricants ont été conduits à mélanger les guttas supérieures, fibreuses, qui ont plus de durée, avec des gommes inférieures qui possèdent un pouvoir isolant plus considérable et une capacité électrostatique plus faible. Il en résulte que la résistance d'isolement et la capacité électrostatique *spécifiques* de la gutta-percha, c'est-à-dire rapportées à l'unité de volume, varient entre certaines limites et doivent être déterminées dans chaque cas particulier. Les guttas du commerce étant d'ailleurs elles-mêmes déjà des mélanges de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

guttas naturelles, les fabricants, pour connaître exactement la valeur des gommes qu'ils achètent, sont obligés de confectionner 500 mètres d'âme avec la gutta de chaque lot et d'en étudier ensuite les propriétés électriques.

La résistance d'isolement R d'un cylindre annulaire d'un diélectrique quelconque est représentée par la formule

$$R = \frac{A \log \frac{D}{d}}{L}$$

dans laquelle A désigne une constante, D et d les diamètres extérieur et intérieur du cylindre, L sa longueur. Pour un câble en gutta-percha, on a *approximativement* par mille marin

$$R = 750 \log \frac{D}{d} \text{ megohms}$$

au bout d'une minute d'électrification et après vingt-quatre heures d'immersion dans de l'eau à 24° C. Lorsque le câble est de fabrication récente, la valeur de A peut n'atteindre que les 2/3 de celle indiquée ci-dessus.

La résistance d'isolement de la gutta-percha diminue très rapidement à mesure que la température s'élève. La loi de la variation est représentée par une relation de la forme

$$\frac{R}{r} = A^t$$

dans laquelle R et r désignent respectivement les résistances à la plus basse et à la plus haute des deux températures considérées dont la différence est de t degrés et A une constante.

Le coefficient A doit être déterminé pour chaque qualité de gutta du commerce. Si t est exprimé en degrés centigrades, la valeur de A, pour une gutta de qualité moyenne, est d'environ 0,87604. On a alors

$$\log R = \log r + t \log 0{,}87604$$

Le tableau[1] de la page 78 donne une idée de la variation de résistance de la gutta-percha à différentes températures, mais ne pourrait être appliqué, avec quelque précision, à une gutta quelconque.

La pression augmente la résistance de la gutta-percha; si l'on désigne par r sa résistance à la pression atmosphérique, par R celle à la pression p, exprimée en kilogrammes par centimètre carré, on aura

$$R = r\,(1 + 0{,}00327\ p)$$

La capacité électrostatique spécifique de la gutta-percha, relativement à celle de l'air prise pour unité, est d'environ 4,2. La capacité électrostatique C

[1] *J. Munro and A. Jamieson's Pocket-Book*, 1885.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'un cylindre annulaire de diamètres extérieur et intérieur D et d est donnée par la relation

$$C = A \frac{L}{\log \frac{D}{d}}$$

L représentant la longueur du cylindre, A une constante.

Pour un câble en gutta-percha, on a *approximativement* par mille marin

$$C = \frac{0,18769}{\log \frac{D}{d}} \text{ microfarads}$$

La constante 0,18769 varie avec la qualité de la gutta.

Résistances relatives (après une minute d'électrification), à différentes températures, de la gutta-percha ordinaire pour des âmes dans lesquelles l'épaisseur de la gutta-percha ne dépasse pas 2,79 m. m. (W. Smith).

TEMPÉRATURE Fah.	TEMPÉRATURE Cent.	Résistance relative	Logarithme de la résistance	TEMPÉRATURE Fah.	TEMPÉRATURE Cent.	Résistance relative	Logarithme de la résistance	TEMPÉRATURE Fah.	TEMPÉRATURE Cent.	Résistance relative	Logarithme de la résistance
32	0,0	23,622	1,373317	55	12,7	4,353	0,638789	78	25,5	0,8354	$\bar{1}$,921893
33	0,5	21,947	1,341375	56	13,3	4,044	0,606811	79	26,1	0,7867	$\bar{1}$,895809
34	1,1	20,391	1,309439	57	13,8	3,757	0,574844	80	26,6	0,7410	$\bar{1}$,869818
35	1,6	18,945	1,277495	58	14,4	3,491	0,542950	81	27,2	0,6978	$\bar{1}$,843731
36	2,2	17,602	1,245562	59	15,0	3,244	0,511081	82	27,7	0,6572	$\bar{1}$,817698
37	2,7	16,354	1,213624	60	15,5	3,013	0,478999	83	28,3	0,6190	$\bar{1}$,791691
38	3,3	15,195	1,181701	61	16,1	2,800	0,447158	84	28,8	0,5829	$\bar{1}$,765594
39	3,8	14,117	1,149742	62	16,6	2,601	0,415140	85	29,4	0,5490	$\bar{1}$,739572
40	4,4	13,116	1,117801	63	17,2	2,417	0,383277	86	30,0	0,5171	$\bar{1}$,713575
41	5,0	12,186	1,085861	64	17,7	2,245	0,351216	87	30,5	0,4870	$\bar{1}$,687529
42	5,5	11,322	1,053923	65	18,3	2,086	0,319314	88	31,1	0,4586	$\bar{1}$,661434
43	6,1	10,520	1,022016	66	18,8	1,938	0,287354	89	31,6	0,4319	$\bar{1}$,635383
44	6,6	9,774	0,990072	67	19,4	1,801	0,255514	90	32,2	0,4068	$\bar{1}$,609381
45	7,2	9,081	0,958134	68	20,0	1,673	0,223496	91	32,7	0,3831	$\bar{1}$,583312
46	7,7	8,437	0,926188	69	20,5	1,555	0,191730	92	33,3	0,3608	$\bar{1}$,557267
47	8,3	7,839	0,894261	70	21,1	1,444	0,159567	93	33,8	0,3398	$\bar{1}$,531223
48	8,8	7,283	0,862310	71	21,6	1,342	0,127753	94	34,4	0,3200	$\bar{1}$,505150
49	9,4	6,767	0,830396	72	22,2	1,247	0,095867	95	35,0	0,3014	$\bar{1}$,479143
50	10,0	6,287	0,798444	73	22,7	1,158	0,063709	96	35,5	0,2839	$\bar{1}$,453165
51	10,5	5,841	0,766487	74	23,3	1,076	0,031812	97	36,1	0,2674	$\bar{1}$,427161
52	11,1	5,427	0,734560	75	23,8	1,000	0,000000	98	36,6	0,2518	$\bar{1}$,401056
53	11,6	5,042	0,702603	76	24,4	0,9418	$\bar{1}$,973959	99	37,2	0,2371	$\bar{1}$,374932
54	12,2	4,685	0,670710	77	25,0	0,8870	$\bar{1}$,947924	100	37,7	0,2233	$\bar{1}$,348889

Le poids de gutta nécessaire pour obtenir une âme de diamètre D, avec un conducteur de diamètre d, D et d étant exprimés tous deux en millimètres, est d'environ

$$1,43 (D^2 - d^2) \text{ kilogrammes}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FABRICATION

L'enveloppe isolante du premier câble Douvres-Calais, en 1850, ne comprenait qu'une seule couche de gutta-percha de 12,5 millimètres de diamètre. On n'avait pas tardé à reconnaître les inconvénients de cette manière de procéder : si, en effet, la fabrication n'est pas parfaitement conduite, le fil se décentre et vient affleurer l'un des bords du cylindre annulaire de gutta ; d'un autre côté, une soufflure ou une impureté quelconque de la gutta, produisant son effet à travers toute l'épaisseur de la matière isolante, donne nécessairement naissance chaque fois à un défaut. Aussi, les âmes du câble à quatre conducteurs de Douvres à Calais de 1851 furent préparés avec deux couches de gutta. Le nombre de ces couches fut augmenté dans la suite et porté, à titre d'essai au moins, jusqu'à vingt : elles étaient rendues adhérentes les unes aux autres, à l'aide de naphte coaltarisé qui est un dissolvant énergique de la gutta; mais on ne pouvait obtenir ainsi que de très mauvais résultats.

En 1857, MM. Chatterton et W. Smith trouvèrent qu'un mélange de gutta-percha, de résine et de goudron de Stockholm, dans les proportions indiquées ci-dessous, produisait l'adhérence désirée entre deux feuilles de gutta, sans altérer en rien les propriétés de cette substance :

Gutta-percha.	3 parties	} en poids.
Résine.	1 partie	
Goudron de Stockholm.	1 partie	

Cette composition, qui fut bientôt universellement employée et est restée connue sous le nom de *composition Chatterton*, ne produit pas seulement une adhérence parfaite entre les diverses couches de gutta, mais entre la première de ces couches et le conducteur en cuivre. On a vu plus haut que l'on en recouvre également le fil central de la cordelette de cuivre, pour empêcher de petites bulles d'air de rester emprisonnées dans les intervalles compris entre les divers brins. Ces bulles, en faisant éclater l'enveloppe isolante, aux points où se produirait un très léger défaut même, aggraveraient subitement toutes les fautes et l'eau, dès qu'elle aurait eu accès en un seul point du conducteur, cheminerait ensuite sur toute sa longueur, comme dans un tube. Bien qu'inférieure à la gutta-percha comme diélectrique, la composition Chatterton doit encore être considérée comme un bon isolant : aussi l'emploi de cette matière a-t-il eu pour effet de tripler immédiatement l'isolement des câbles.

Depuis un certain nombre d'années cependant, de sérieuses objections ont été élevées contre la composition Chatterton, dans le but d'en faire,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sinon proscrire, au moins restreindre notablement l'usage. On a fait remarquer que si le goudron de Stockholm est sans action sur la gutta-percha, il n'en est pas de même de la créosote et d'autres principes analogues qui dissolvent cette substance; or, les goudrons du commerce en contiennent toujours une quantité plus ou moins grande. L'évaporation d'une partie au moins de l'eau mécaniquement interposée laissant la gutta plus poreuse et par conséquent mieux disposée à l'absorption de ces principes, M. Truman avait proposé de revenir aux enveloppes de gutta faites d'une seule pièce.

Il estimait que les procédés de fabrication sont aujourd'hui assez perfectionnés pour qu'il soit possible, sans recourir à l'emploi de couches successives de gutta, d'une part, d'obtenir un bon centrage du conducteur en cuivre et, d'autre part, d'éviter l'introduction de bulles d'air dans le diélectrique. On devait réaliser ainsi en outre une économie sensible sur les frais de fabrication, le fil n'ayant plus à passer qu'une seule fois dans la machine à recouvrir de gutta. Subsidiairement, il conseillait, dans le cas où l'on croirait devoir maintenir l'application de la gutta par couches, de supprimer toute composition intermédiaire [1]. Ces vues n'ont été adoptées jusqu'à présent, d'une manière à peu près complète, que pour les câbles souterrains et téléphoniques. En Angleterre, on recouvre les conducteurs de ces câbles d'une seule couche de gutta. En France, au lieu de donner à la première couche du diélectrique une surface lisse, on la rend un peu rugueuse et on la chauffe très légèrement, avant de faire repasser le fil une seconde fois dans la presse ; on obtient ainsi une adhérence suffisante entre les deux couches. On a cherché cependant à diminuer aussi l'introduction de la composition Chatterton dans les câbles sous-marins qui ont été construits à Silvertown pendant ces dernières années, et qui ont été immergés entre différents points de l'Amérique centrale et de l'Amérique du Sud, en réduisant à deux le nombre des couches de gutta.

Epuration de la gutta-percha.

La gutta-percha arrivant en Europe, mélangée de toutes sortes d'impuretés, écorces, bois, terre, pierres, morceaux de fer même que les indigènes ajoutent parfois pour en augmenter le poids, ne peut être mise en œuvre qu'après avoir subi une série d'épurations qui, pour ne pas nuire à ses qualités électriques, doivent se faire à chaud, à une température qui ramollisse suffisamment la matière, sans cependant l'amener à l'état de fusion complète.

Les pains de gutta, dont les formes et les dimensions sont très variables,

[1] *Journal of the Society of telegraph Engineers and Electricians*, 1877, vol. VI.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont d'abord coupés en tranches, à l'aide d'une machine analogue aux coupe-racines et représentée par la figure 42. Une grande roue en bois A, à laquelle

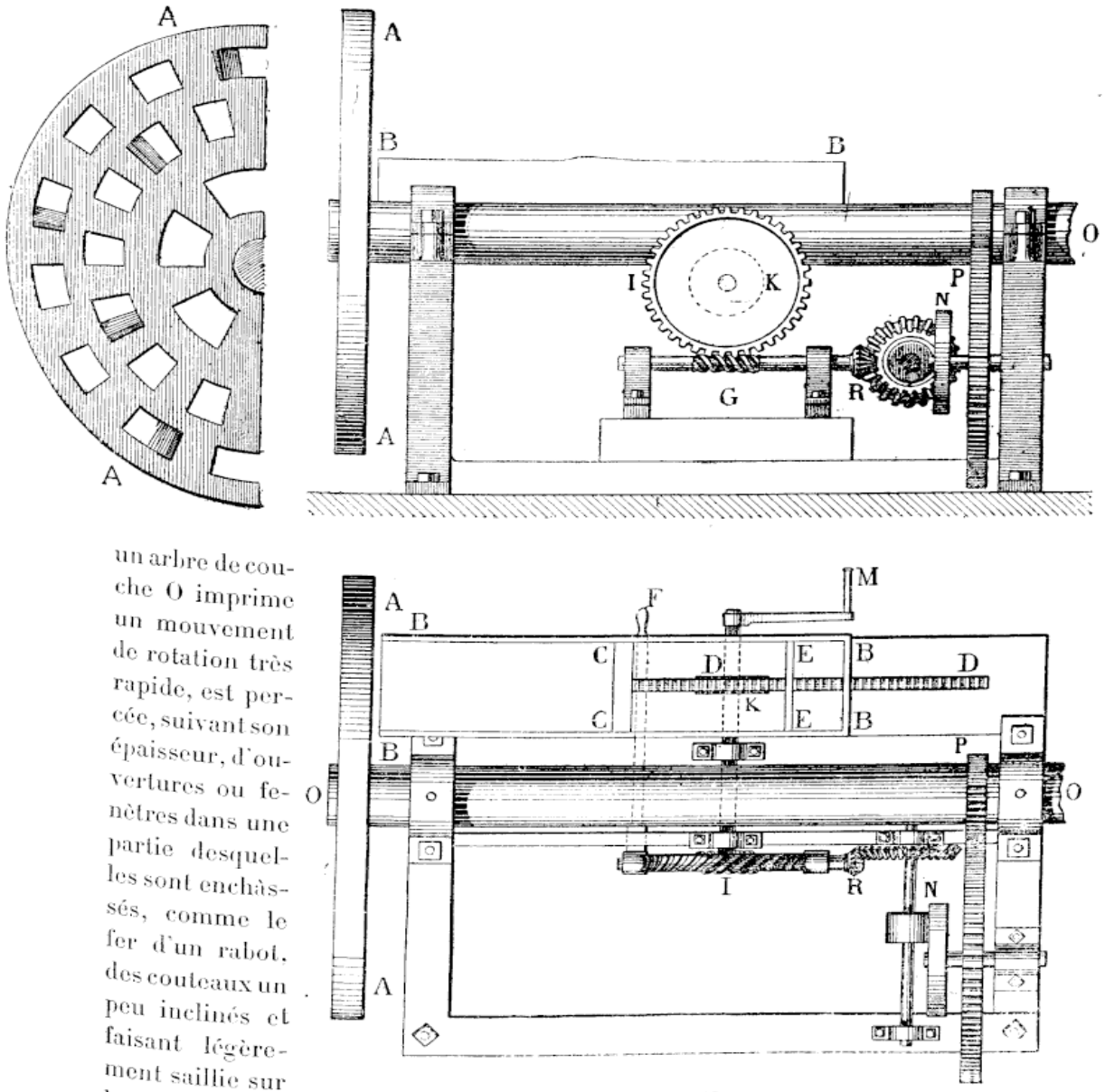


Fig. 42.

un arbre de couche O imprime un mouvement de rotation très rapide, est percée, suivant son épaisseur, d'ouvertures ou fenêtres dans une partie desquelles sont enchâssés, comme le fer d'un rabot, des couteaux un peu inclinés et faisant légèrement saillie sur le plan de la roue, du côté de la caisse en bois B. Dans cette caisse se trouve un plateau C muni d'une tige à crémaillère D à laquelle l'arbre O communique, par l'intermédiaire d'une série d'engrenages K, I, G, R, P et de rouleaux de fric-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion N, un mouvement lent et uniforme de translation vers la roue A. Les pains de gutta qui remplissent la caisse B, en avant du plateau C, sont refoulés contre la roue A et débités en copeaux, au fur et à mesure de leur avancement sous les couteaux. Lorsque le plateau arrive à l'extrémité de sa course, on pèse sur le levier F qui permet de séparer la vis sans fin G de la roue dentée I, et on ramène le plateau C en arrière, à la main, à l'aide de la manivelle M : on recharge de gutta la caisse B et l'opération recommence.

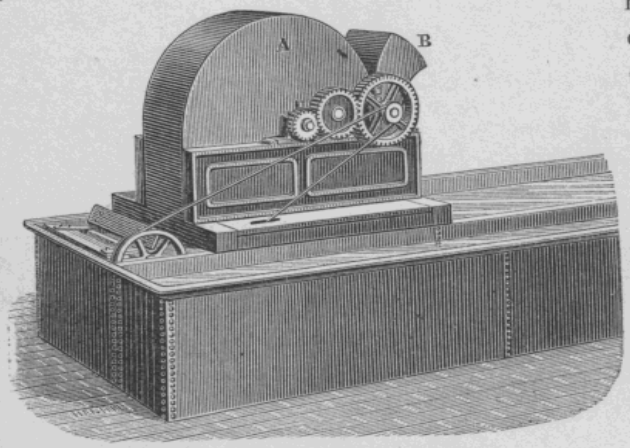


Fig. 43.

Les tranches ainsi obtenues tombent dans un récipient et sont d'abord purgées, à la main, des matières les plus grossières qu'elles contiennent. On les porte ensuite dans un caisson en fer rempli d'eau qu'un courant de vapeur maintient à une température élevée et qu'un agitateur, mû mécaniquement, brasse constamment. Une partie des impuretés tombe au fond du caisson ; les morceaux de gutta, ramollis, surnagent et s'agglomèrent en une masse pâteuse, compacte, que l'on pêche à l'aide d'une sorte de pelle faite en toile métallique à larges mailles pour la porter dans la râpe.

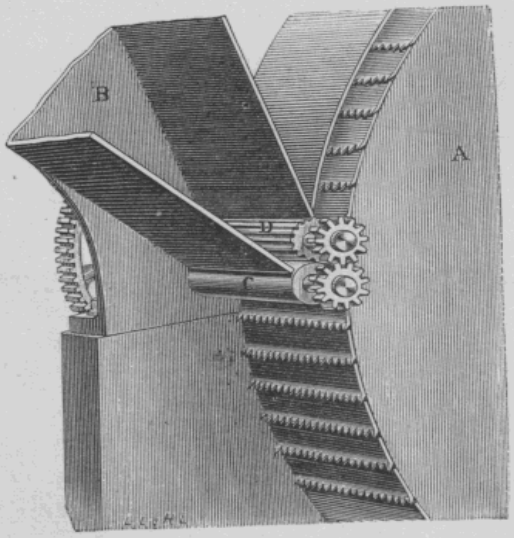


Fig. 44.

La *râpe* (fig. 43) se compose d'un tambour en fonte A, sur la périphérie duquel sont enchâssés des couteaux à dents de scie en acier (fig. 44), et faisant au moins 500 révolutions par minute. La masse pâteuse de gutta que l'on verse dans la trémie B passe entre deux petits rouleaux C et D, l'un lisse et l'autre strié à la surface, qui l'amènent sous le tambour A, dont les couteaux la déchiquettent en petits morceaux. Ces morceaux tombent dans un grand réservoir en fer plein d'eau froide battue par un agitateur à palette toujours en mouvement. La gutta séjourne pendant deux ou trois heures

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans ce réservoir et se débarrasse d'une nouvelle partie de ses impuretés : elle surnage, tandis que les matières étrangères tombent au fond.

Après ce nettoyage, on transporte la gutta dans un caisson d'eau bouillante analogue à celui décrit plus haut ; lorsqu'elle est suffisamment ramollie,

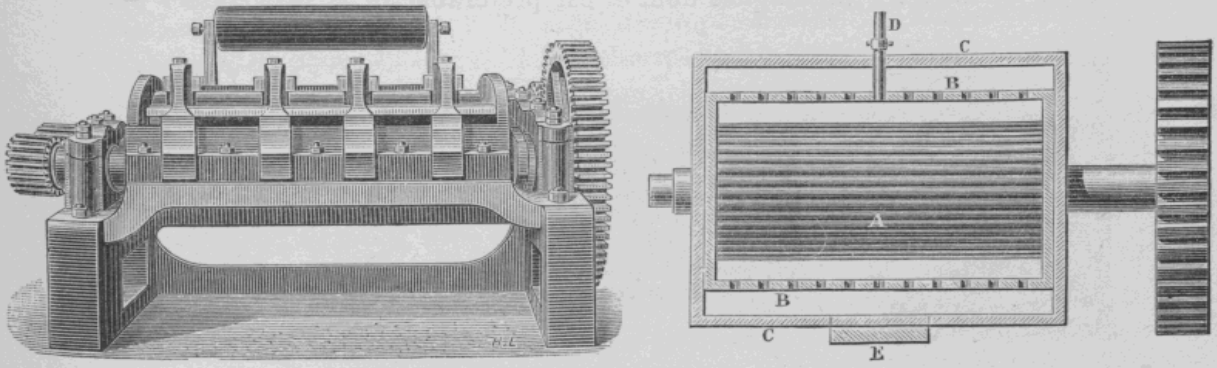


FIG. 45.

on la soumet à un lavage à fond dans une machine spéciale dite *machine à laver*.

Un cylindre plein A (fig. 45), dont la surface est couverte de cannelures, tourne à l'intérieur d'un cylindre creux B percé de trous et enfermé lui-même

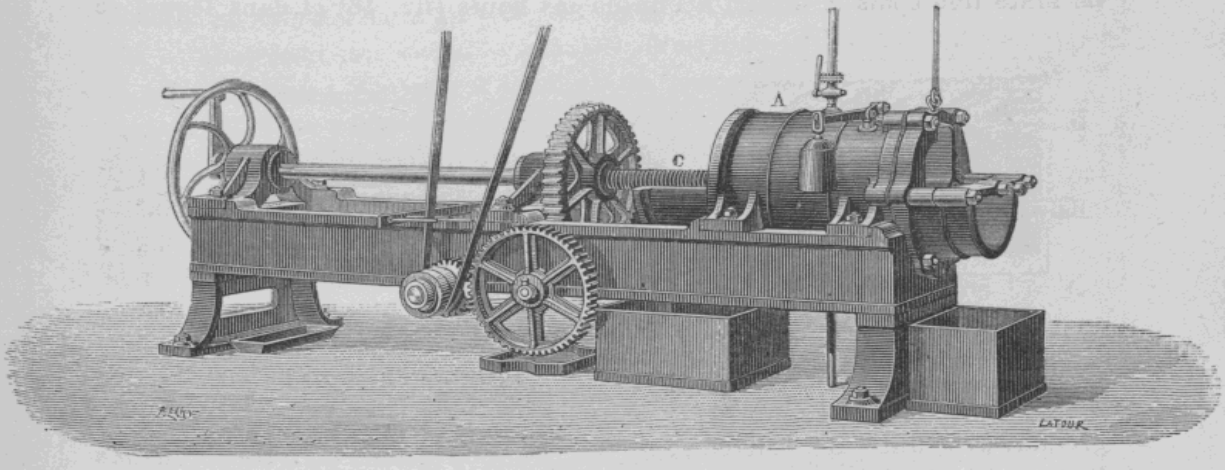


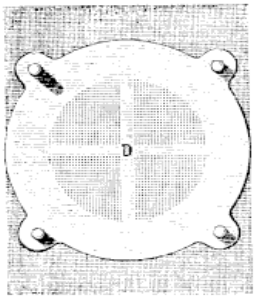
FIG. 46.

dans un second cylindre creux C. La gutta-percha est placée entre le cylindre cannelé et le cylindre B ; l'intervalle des deux cylindres annulaires est rempli d'eau chauffée par un jet de vapeur qu'amène un petit tuyau D. Le mouvement de rotation du cylindre cannelé comprime la masse de gutta contre le cylindre B et la force à s'étaler ; toutes les parties de cette substance arrivent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ainsi successivement en contact avec l'eau qui en enlève les impuretés. Celles-ci se rassemblent au fond du cylindre C, d'où on peut les évacuer par la porte E.

La gutta ainsi traitée ne contient plus généralement que de très petits débris de matières organiques dont il est préférable de la débarrasser par



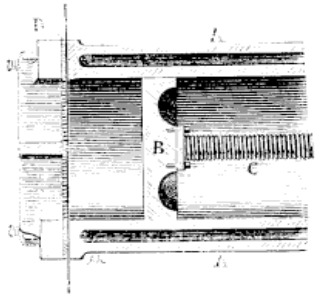


Fig. 47.

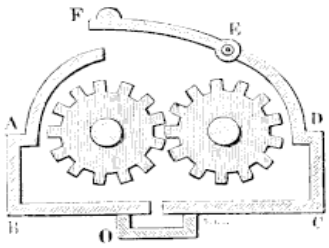


Fig. 48.

un procédé purement mécanique, des lavages trop prolongés ayant l'inconvénient d'incorporer à la gutta une certaine quantité d'eau qu'il devient ensuite très difficile d'éliminer complètement.

Cette opération s'effectue dans une *presse à filtrer*, composée d'un cylindre en fonte très épais A ouvert à l'un de ses bouts (fig. 46) et dans lequel se

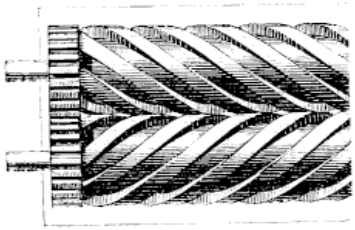


Fig. 49.

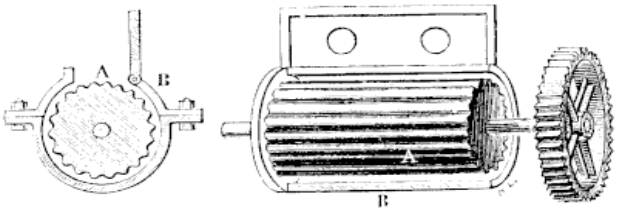


Fig. 50.

meut un piston B (fig. 47), dont la tige C est soumise à l'action d'une presse hydraulique ou reçoit d'un arbre de couche, à l'aide d'une roue dentée engrenant avec une partie filetée de la tige, un mouvement de translation très lent vers le fond du cylindre. Ce fond est fermé par une forte plaque en fonte percée de trous, sur laquelle on applique une toile métallique à mailles très serrées. Les parois du cylindre sont creuses et remplies de vapeur pour empêcher la gomme de se solidifier. Le cylindre étant rempli de la gutta à purifier, on applique la pression sur le piston ; la matière est refoulée et forcée de filtrer à travers la toile métallique : on la recueille dans un récipient placé sous le cylindre. Lorsque le piston est arrivé à un ou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

deux centimètres du fond, on arrête le mouvement et on retire de l'appareil un gâteau dans lequel se sont rassemblées toutes les impuretés.

La gutta est portée ensuite dans le *sécheur* composé d'une caisse en fonte rectangulaire A B C D (fig. 48), à doubles parois entre lesquelles on fait circuler de la vapeur. La caisse est fermée à sa partie supérieure par un couvercle demi-cylindrique A E D, muni d'une partie mobile E F, que l'on peut maintenir en place à l'aide de solides barres en fer. A l'intérieur de la caisse se trouvent deux cylindres, à axes parallèles, portant des cannelures hélicoïdales, de directions opposées et tournant en sens contraire l'un de l'autre (fig. 49). La gutta, saisie entre les deux cylindres, s'étale dans le vide des cannelures et présente ainsi constamment de nouvelles surfaces au contact de l'air chaud contenu dans la caisse. L'eau condensée se rassemble dans le fond et peut être évacuée par l'ouverture O.

On achève de débarrasser la gutta d'une partie de l'eau qu'elle contient dans ses pores, en la faisant passer dans un *masticateur*. Cette machine (fig. 50) se compose d'un cylindre A portant des cannelures parallèles à son axe, et tournant dans une caisse cylindrique B chauffée à la vapeur ; cette caisse est surmontée d'un couvercle percé de deux trous et mobile autour de charnières. La gutta, comprimée entre le cylindre cannelé et la caisse B, soulève le couvercle, à chaque rotation du cylindre, et présente une nouvelle surface au contact de l'air extérieur, en abandonnant une partie de son eau et absorbant une certaine quantité d'oxygène. Aussi la matière brunit de plus en plus : l'ouvrier l'examine de temps à autre et reconnaît à sa couleur et à sa consistance le moment où il convient de la porter au laminoir. Si on en étire un fragment entre les doigts de manière à lui donner la finesse d'une peau de baudruche, la gutta devient parfaitement translucide et permet à un œil, même non exercé, d'apercevoir les plus petites traces d'impuretés, si elle en contient encore.

Le *laminoir* (fig. 51), dans lequel on étale la gutta purifiée, consiste en deux cylindres à surface bien lisse, tournant en sens inverse l'un de l'autre ; la gutta passe dans l'intervalle libre entre les deux cylindres et est recueillie à sa sortie sur une longue pièce de toile sans fin et de la largeur même des cylindres. L'épaisseur de la couche de gutta est de 2 centimètres environ. On la coupe en tranches de 30 à 40 centimètres de largeur, de manière à en former des sortes de galettes que l'on conserve en magasin à l'abri de la lumière et de la poussière jusqu'au moment de leur emploi.

Les procédés d'épuration de la gutta que nous venons de décrire sont ceux généralement employés en Angleterre : ils sont un peu simplifiés en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

France, bien que poussés à un haut degré de perfection. A l'usine de Bezons, on porte directement la gutta au sortir de la râpe et après l'avoir ré-

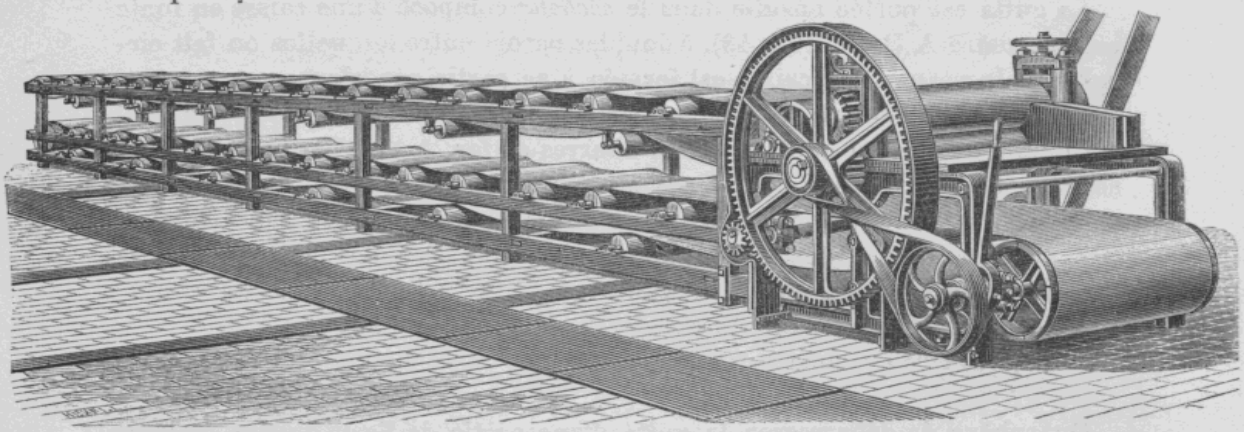


Fig. 51.

chauffée, dans la presse à filtrer et, de là, dans la machine à laver qui a une disposition spéciale à laquelle on donne le nom de *truman*. Cette machine se compose (fig. 52) de trois rouleaux en fonte A de 10 centimètres de

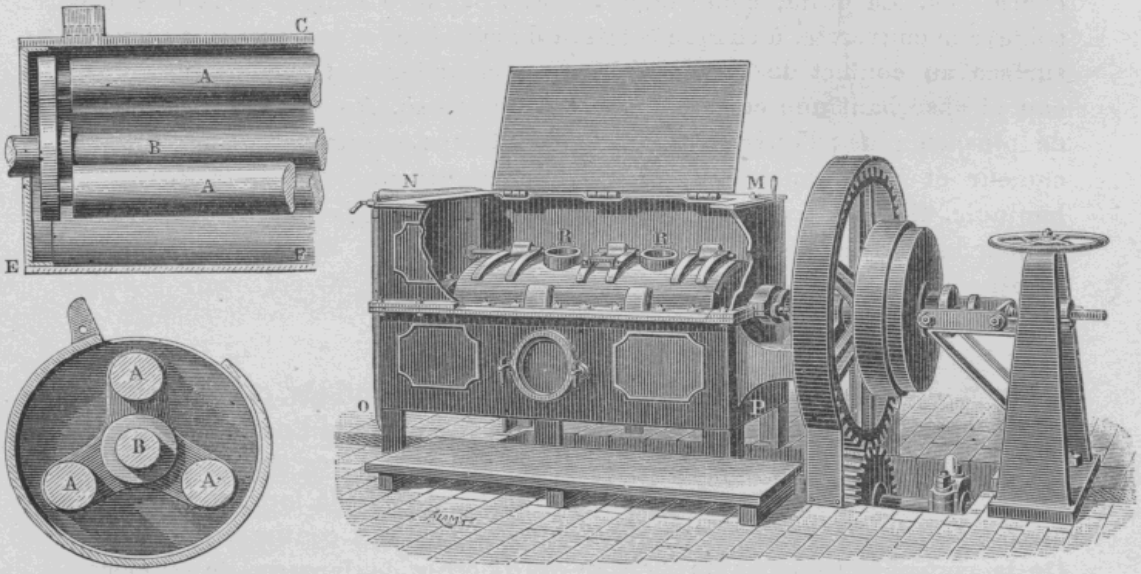


Fig. 52.

diamètre environ, disposés à des intervalles de 120° autour d'un axe central B, auquel ils sont reliés par des traverses en fonte et auquel l'arbre de couche général de l'atelier transmet le mouvement. L'axe B, avec les trois rouleaux, tourne à l'intérieur d'un cylindre creux en fonte C D E F, muni

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'un couvercle qui est percé de deux larges trous R et que l'on peut assujettir solidement sur le cylindre. Le tout est renfermé dans une grande caisse M N O P en tôle que l'on remplit d'eau. La gutta, pressée par les rouleaux contre le cylindre C D E F, présente constamment de nouvelles surfaces au contact de l'eau et abandonne une partie de ses impuretés qui tombent au fond de la caisse M N O P, d'où on les retire lorsque l'opération est terminée. La gutta séjourne en moyenne pendant deux heures dans le truman.

La gutta est travaillée ensuite dans le *masticateur sécheur*, qui est tout à fait analogue au sécheur anglais : toutefois, les cannelures sont interrompues

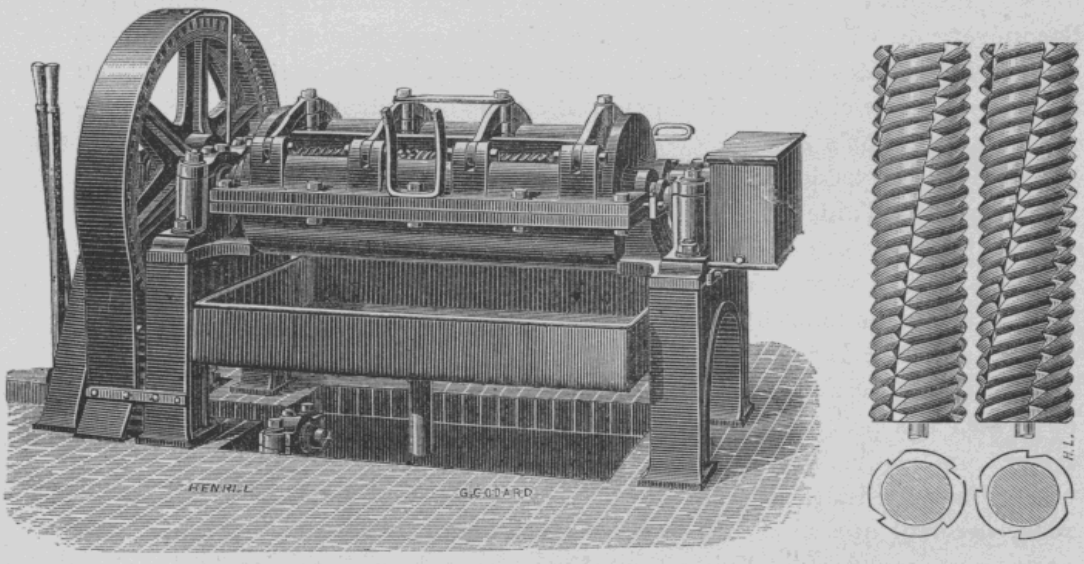


Fig. 53.

sur les cylindres, à des intervalles de dix centimètres environ (fig. 53), de manière à obliger les surfaces de la gutta, mises en contact avec l'air, à se renouveler plus fréquemment.

Au sortir du masticateur sécheur, la gutta est introduite directement dans le laminoir décrit plus haut.

Dans l'usine de M. Menier, à Grenelle, les cylindres du laminoir sont très rapprochés de manière à donner des feuilles de gutta très minces que l'on expose à l'air libre pendant sept ou huit jours, pour en achever la dessiccation. Ces feuilles sont retravaillées ensuite dans un masticateur et étalées dans un second laminoir qui donne les galettes que l'on conserve en magasin. Ce procédé permet d'obtenir une gutta contenant un peu moins

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'eau, mais doit en revanche faciliter davantage, croyons-nous, l'oxydation de la gomme.

On fait passer la gutta une seconde fois dans la râpe, dans la machine à filtrer et dans le truman, lorsqu'au sortir des machines la matière ne se présente pas dans des conditions satisfaisantes.

Machines à recouvrir de gutta-percha.

La gutta employée pour le revêtement des conducteurs en cuivre est généralement un mélange de diverses guttas choisies, les unes d'après leurs propriétés physiques, les autres d'après leurs qualités électriques, et prises dans des proportions telles que le mélange satisfasse aux conditions spécifiées par l'acquéreur du câble. Les plaques de gutta, convenablement ramollies, sont d'abord introduites dans un masticateur (fig. 50), afin de rendre la pâte bien homogène. Celle-ci est portée ensuite dans des cylindres verticaux ou horizontaux, accouplés deux à deux et dans lesquels se meuvent des pistons (fig. 54) : les tiges de ces pistons sont filetées sur une très grande longueur et reçoivent, à l'aide d'un jeu d'engrenages, un mouvement de translation très lent et inverse l'un de l'autre, c'est-à-dire tel que lorsque l'un des pistons s'avance vers le fond du cylindre, l'autre remonte dans le sens opposé et *vice versâ*. Les fonds des deux cylindres communiquent, par deux conduits, avec une boîte à large section qui est percée, en A, de trous dans lesquels on engage des filières de dimension convenable et, en B, de trous exactement en regard des précédents et qui reçoivent des filières du calibre immédiatement inférieur. Des vannes permettent d'intercepter la communication entre chaque cylindre et la boîte : on peut ainsi recharger de gutta le cylindre vide, pendant que le second continue à alimenter les filières, sans interrompre un seul instant l'opération. Un courant de vapeur circule dans une double enveloppe des cylindres, de manière à maintenir suffisamment fluide la gutta-percha qu'ils renferment.

Les torons en cuivre que l'on veut recouvrir de gutta, au nombre de cinq ou six généralement, sont enroulés sur des bobines dont les axes reposent sur des tourillons que supporte un grand cadre en fonte légèrement incliné. Ils traversent un peigne métallique qui leur donne une direction bien parallèle, et passent au-dessus de becs de gaz qui brûlent les matières organiques déposées à leur surface et les disposent ainsi à mieux adhérer à l'enveloppe isolante qui doit les recouvrir. Ces torons pénètrent ensuite dans une petite caisse en fer contenant de la composition Chatterton qu'un courant de vapeur, circulant dans une enveloppe extérieure, maintient bien fluide ; ils en sortent par des filières d'un diamètre très légèrement supérieur à leur propre diamètre, de manière à ne pouvoir se charger que d'une quantité de composi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion extrêmement minime. Enfin, ils arrivent dans la boîte à gutta et, sous l'action de la pression du piston, emportent une quantité de cette matière suffisante pour les recouvrir d'une couche dont l'épaisseur est déterminée par le diamètre même des filières. L'excès de gutta et les bulles d'air qui

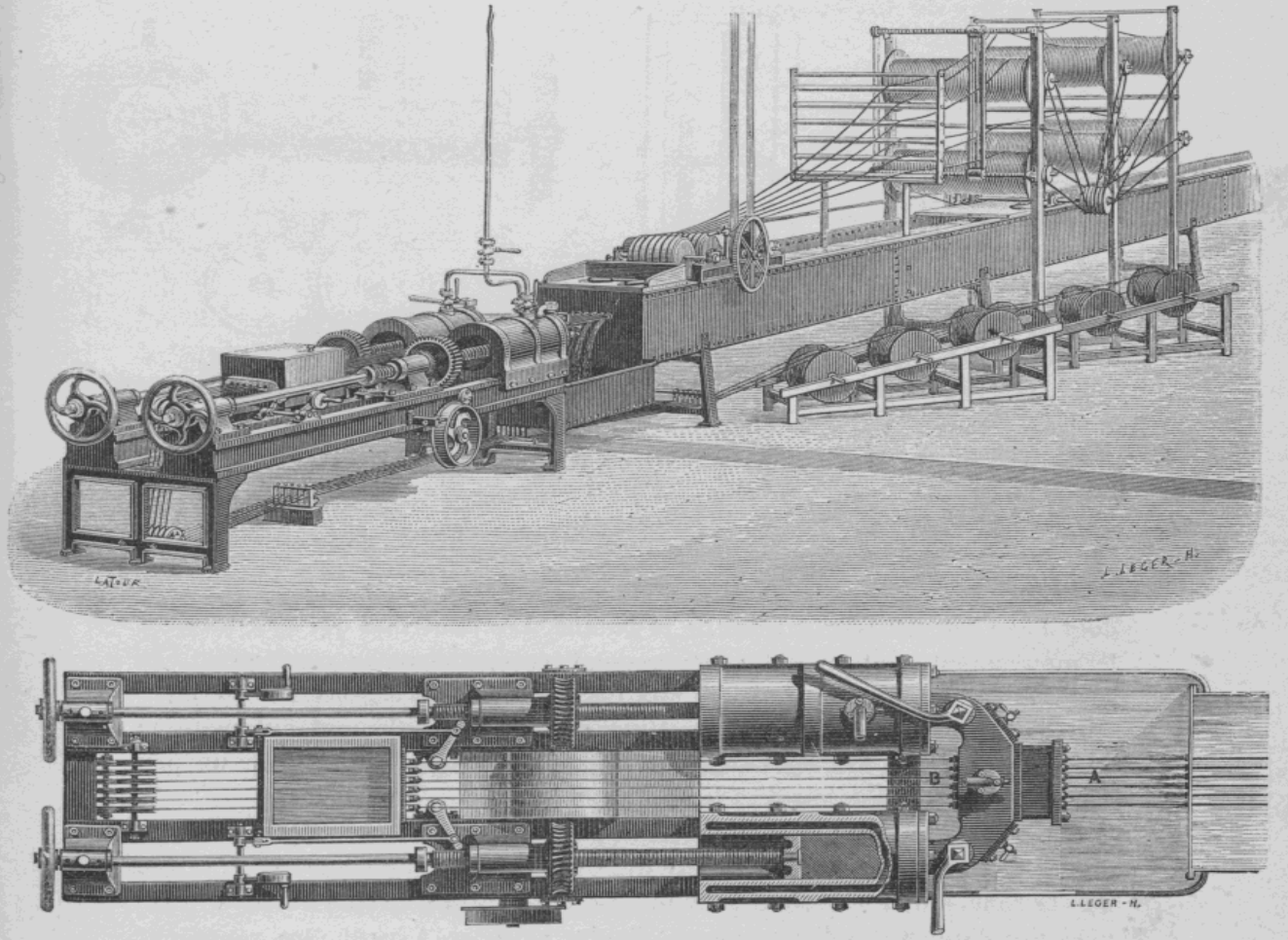


FIG. 54.

peuvent se trouver dans le cylindre s'échappent à travers un petit orifice dont on règle l'ouverture à l'aide d'un robinet manœuvré à la main ; la gutta est recueillie dans un vase placé au-dessous.

Les fils de cuivre ainsi recouverts une première fois de gutta traversent de longues auges remplies d'eau bien pure et dont la température doit être très constante dans toutes les saisons : de l'eau de puits à 12° ou 13° convient parfaitement pour cet objet. La gutta se refroidit et prend de la consistance ; les fils passent entre deux cylindres formant laminoir et recouverts de caout-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chouc, pour éviter que la gutta, pressée contre une surface dure, puisse être endommagée, et enfin s'enroulent sur de grandes bobines. Pour obtenir un enroulement régulier, chaque fil passe entre deux guides verticaux portés par un écrou qui se déplace le long d'une vis à deux filets contraires et

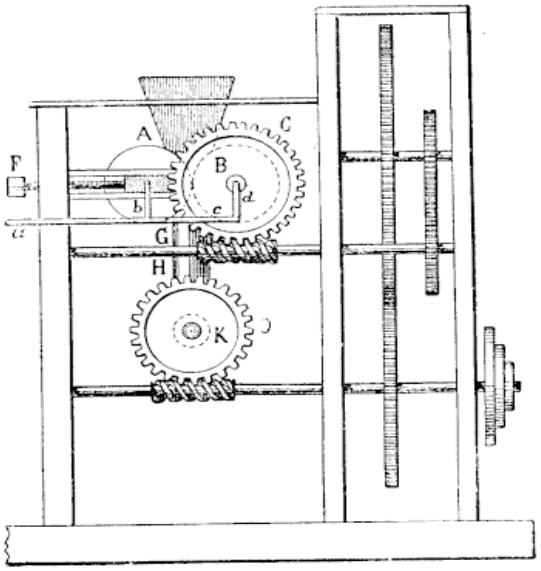


Fig. 55.

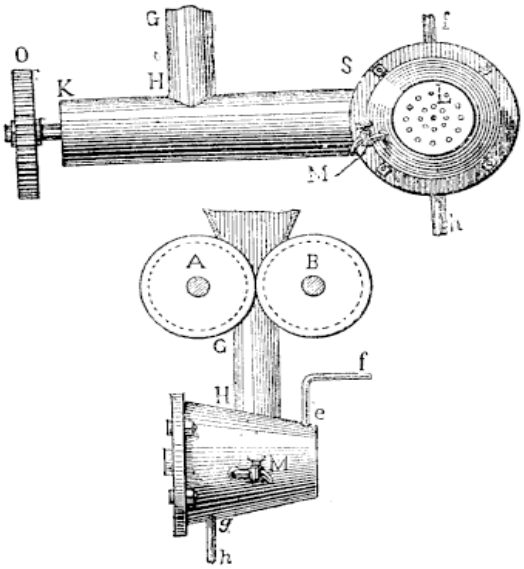


Fig. 56.

dont l'axe est parallèle à celui de la bobine. Les courroies qui transmettent le mouvement sont en gutta, légèrement extensibles par conséquent, de sorte qu'aucune traction nuisible aux fils ne peut être exercée sur eux.

L'alimentation de la filière à gutta-percha et l'enroulement automatique des fils recouverts sur les bobines se font quelquefois d'une façon un peu différente.

L'appareil qui remplace la presse à deux cylindres se compose (fig. 55 et 56) d'un laminoir A B, dont l'un des cylindres B, monté sur le même axe que la roue dentée C, reçoit le mouvement de l'arbre de couche par l'intermédiaire d'une série d'engrenages ; l'autre cylindre A peut être rapproché plus ou moins de B au moyen de deux vis F, F qui commandent son axe. La gutta est versée à l'état fluide dans une trémie au-dessus du laminoir A B et descend par l'effet de son laminage dans un tube vertical G H qui est greffé à angle droit sur un tube horizontal K S. Celui-ci est ajusté en S sur le réservoir à filières L et contient une petite vis d'Archimède mue par la roue dentée O. La gutta se trouve ainsi refoulée vers le réservoir L : l'excédent de la matière s'écoule par le robinet de trop plein M. Les tubes *ab*, *cd*, *ef*, *gh* sont des tubes de vapeur qui chauffent les deux premiers les cylindres du laminoir, les deux autres l'enveloppe du réservoir L.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le second appareil d'enroulement automatique des fils recouverts se compose (fig. 57) d'un châssis en bois M N P Q, à l'intérieur duquel les bobines A sont disposées sur deux rangs. L'axe qui traverse chaque bobine porte une poulie B reliée par une courroie sans fin B C à une autre poulie C ; toutes les poulies C sont placées sur deux axes commandés par un arbre E E qui

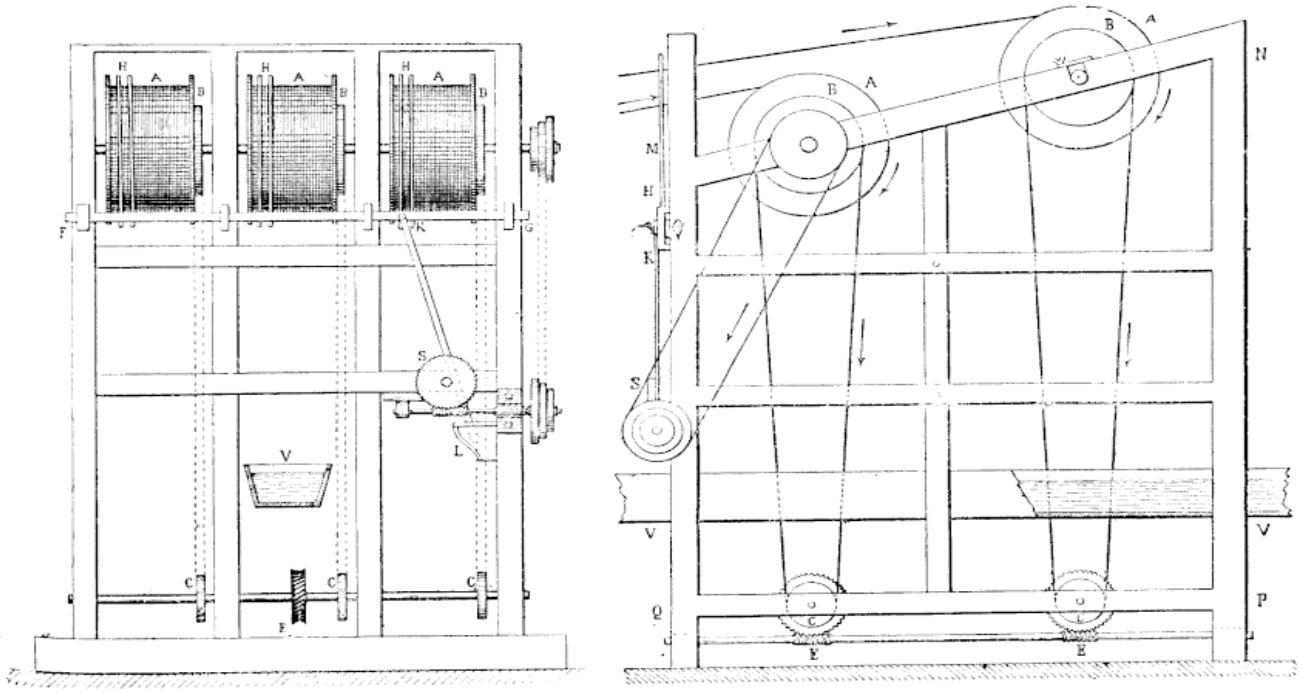


Fig. 57.

règne sous le réservoir à eau V et qui porte deux vis sans fin. Pour donner aux fils, en même temps qu'ils s'enroulent, le déplacement nécessaire dans le sens de l'axe des bobines, on fait passer chacun d'eux entre deux guides H portés par une tige horizontale F G. Cette tige reçoit un mouvement de translation dans le sens de sa longueur au moyen du levier L K (fig. 58), mobile autour d'un point fixe L convenablement choisi. Le long du levier peut se déplacer une virole R qui se trouve engagée en même temps dans une rainure en forme de spirale creusée sur un disque S. Ce disque, commandé par la première des bobines A, force, en tournant, la virole R à suivre tous les contours de la rainure spiraliforme ; le mouvement de translation de la tringle F G se trouve ainsi, non seulement rendu alternatif, mais ralenti au fur et à mesure que le diamètre des couches augmente sur les bobines.

Les fils sont transportés ensuite dans une chambre spéciale où on les enroule sur d'autres bobines ; un ouvrier les fait glisser dans ses mains et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

s'assure qu'il n'existe à leur surface aucune fissure. Il répare les défauts en chauffant légèrement la gutta avec une lampe à esprit de bois et pétrissant la matière entre ses doigts.

Les fils reconnus en bon état ou réparés, le cas échéant, sont recouverts de la même manière de deux autres couches de gutta ; on se borne à changer les filières à travers lesquelles on fait passer les fils, dans les boîtes à Chatterton et à gutta. On procède aux mêmes vérifications et réparations après l'application de chaque couche de gutta.

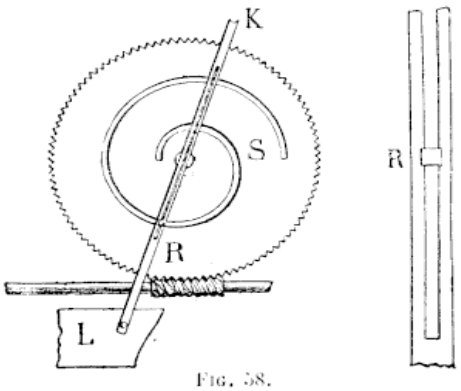


FIG. 58.

Les âmes dont la fabrication est terminée sont mesurées et pesées. Le poids du toron de cuivre étant déjà connu par une pesée antérieure, on en déduit celui des longueurs de cuivre non recouvert aux deux extrémités, et on obtient, par un calcul facile, les poids de cuivre et de gutta de l'âme qui est enroulée sur chaque bobine.

On donne un numéro d'ordre à chacune d'elles et on inscrit les résultats obtenus sur un carnet conforme au modèle ci-dessous.

BOBINES D'AMES

Longueurs et poids de cuivre et de gutta-percha.

MODÈLE N° 1.

DATES DE LA FABRICATION	NUMÉROS D'ORDRE DES BOBINES	LONGUEUR DES AMES		POIDS DU CUIVRE		POIDS DE LA GUTTA-PERCHA		POIDS DE L'AME		DIAMÈTRES EN MILLIMÈTRES		$\log \frac{D}{d}$	OBSERVATIONS
		en mètres	en milles marins	total	par mille marin	total	par mille marin	total	par mille marin	du conducteur en cuivre	de l'âme D		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Signature :

On plonge les bobines dans une cuve contenant de l'eau que l'on maintient à la température de 24° C., à l'aide de courants de vapeur qui circulent dans des tuyaux ou dans un double fond. Au bout de quinze jours, on procède aux essais électriques et on en consigne les résultats sur de nouveaux carnets dont nous donnerons les modèles dans la quatrième par-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tie de cet ouvrage [1]. Les bobines sont conservées ensuite sous l'eau et à l'abri de la lumière, jusqu'au moment de leur emploi.

Lorsqu'on veut en réunir un certain nombre pour les recouvrir d'enveloppes protectrices extérieures et en former un câble, à mesure qu'une bobine est engagée dans la machinerie, on en soude une autre à l'extrémité de la première, suivant les méthodes qui seront exposées plus loin. Cette précaution est nécessaire afin de laisser toujours à la machine une avance de deux milles environ, une soudure ne pouvant être essayée dans de bonnes conditions que vingt-quatre heures au moins après sa confection. On essaie chaque soudure avec des instruments très délicats et on lui donne un numéro d'ordre. Les résultats de ces essais sont encore portés sur un carnet dont nous donnerons également le modèle plus tard. L'ordre dans lequel sont assemblées les bobines, leurs longueurs et les poids des matières qui constituent les âmes, sont inscrits enfin sur un registre du type ci-dessous.

Câble de..... à.....

Bobines employées, longueurs et poids du conducteur et de la gutta-percha.

MODÈLE N° 2

DATES	NUMÉROS DES BOBINES	LONGUEURS				POIDS PAR BOBINES			Numéro d'ordre des soudures	OBSERVATIONS
		primitives des bobines en milles marins	RETRANCHÉES après la 1re soudure	RETRANCHÉES après la 2e soudure	en circuit en milles marins	Longueurs totales en circuit en milles marins	du cuivre	de la gutta-percha	de l'âme	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Signature :

Un homme suit durant toute la fabrication les différentes soudures de l'âme, et les marque sur chaque enveloppe. Lorsque le câble est recouvert de la dernière couche de composition bitumineuse, la position du joint est indiquée par un morceau de cuir ou de gutta-percha que l'homme attache au câble par un bout de bitord, et qui a reçu à l'emporte-pièce le numéro du joint. D'autres morceaux de gutta ou de cuir, portant une série distincte de numéros, sont attachés en outre au câble à chaque mille marin marqué par le compteur de la machine. Les positions de toutes ces marques dans chaque couche et les numéros des couches correspondantes sont également relevées et notées. Il est ainsi toujours facile de retrouver une soudure et d'y couper le câble, dans le cas où une faute viendrait à se déclarer.

[1] Dans quelques usines on fait maintenant, en outre, des essais à des températures comprises entre 5 et 10° C., l'isolement élevé de la gutta-percha à ces températures permettant de découvrir plus facilement les fautes très légères.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a généralement renoncé à soumettre les âmes après leur fabrication, à des essais sous pression, à l'aide de l'appareil de Reid. D'une part on peut éviter aujourd'hui, par une fabrication soignée, les bulles d'air qui restaient enfermées entre les différents brins du conducteur central ; d'autre part, ainsi qu'il résulte de l'expérience suivante, faite par M. W. Smith, la pression, loin de faire découvrir les défauts, tend au contraire à les rendre moins apparents. Une pièce fautive de câble, soumise à des pressions croissantes, donna les isolements indiqués ci-après :

1	atmosphère	49	megohms par mille
17,5	—	51	—
35	—	53	—
52,5	—	54	—
70	—	55	—
87,5	—	57	—
105	—	58	—
122,5	—	58	—
140	—	63	—
157,5	—	64	—
175	—	90	—
183,5	—	115	—

Toute la pression ayant été enlevée brusquement, l'isolement s'éleva à 178 Ω, puis tomba lentement pour revenir à 49 Ω au bout de dix-sept heures seulement. En diminuant la pression progressivement, l'isolement augmenta graduellement jusqu'à ce que la pression eût entièrement disparu ; il commença alors à baisser immédiatement après.

GUTTA-PERCHA PERFECTIONNÉE DE W. SMITH

M. W. Smith soumet la gutta à un traitement particulier qui paraît être de nature à en favoriser l'oxydation, si l'on en juge d'après le nom de *gutta surchauffée* qu'on donne parfois à cette substance : le diélectrique des câbles de l'*Eastern telegraph* C° en est presque exclusivement formé.

La résistance d'isolement de la gutta perfectionnée de W. Smith, après une minute d'électrification et à la température de 0° C., est sensiblement la même que celle de la gutta ordinaire. Si l'on fait passer pendant longtemps le courant à cette même température, la résistance d'isolement de la gutta perfectionnée n'est plus que les 72/100 environ de celle de la gutta ordinaire, prise dans les mêmes conditions.

A la température de 24° C., cette résistance, après une minute d'électrification, est représentée approximativement par la formule

$$R = 350 \log \frac{D}{d} \text{ megohms}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

elle est donc inférieure de plus de moitié alors à celle de la gutta-percha ordinaire.

La résistance R_t de la gutta de W. Smith, après une minute d'électrification, à une température t inférieure à 24°, est exprimée, en fonction de sa résistance à cette température R_{24}, par la relation

$$\log R_t = \log R_{24} + (0,06447 - 0,00017\ t)\ (24 - t)$$

On obtient des résultats plus précis à l'aide de la table[1] suivante déduite entièrement de données fournies par l'expérience.

Résistance relative (après une minute d'électrification), à différentes températures de la gutta-percha perfectionnée de Willoughby Smith, pour des âmes dans lesquelles l'épaisseur de la gutta-percha ne dépasse pas 2,79 m. m.

TEMPÉRATURE		Résistance relative	Logarithme de la résistance	TEMPÉRATURE		Résistance relative	Logarithme de la résistance	TEMPÉRATURE		Résistance relative	Logarithme de la résistance
Fah.	Cent.			Fah.	Cent.			Fah.	Cent.		
32	0,0	27,913	1,445807	55	12,7	4,704	0,672467	78	25,5	0,8240	$\bar{1}$,915927
33	0,5	25,834	1,412192	56	13,3	4,354	0,638888	79	26,1	0,7725	$\bar{1}$,887890
34	1,1	23,91	1,378580	57	13,8	4,029	0,605197	80	26,6	0,7242	$\bar{1}$,859839
35	1,6	22,128	1,344942	58	14,4	3,729	0,571592	81	27,2	0,6789	$\bar{1}$,831806
36	2,2	20,48	1,311330	59	15,0	3,451	0,537945	82	27,7	0,6365	$\bar{1}$,803798
37	2,7	18,954	1,277701	60	15,5	3,194	0,504335	83	28,3	0,5967	$\bar{1}$,775756
38	3,3	17,542	1,244079	61	16,1	2,956	0,470704	84	28,8	0,5594	$\bar{1}$,747723
39	3,8	16,235	1,210452	62	16,6	2,736	0,437116	85	29,4	0,5245	$\bar{1}$,719746
40	4,4	15,025	1,176815	63	17,2	2,532	0,403464	86	30,0	0,4917	$\bar{1}$,691700
41	5,0	13,906	1,143202	64	17,7	2,343	0,369772	87	30,5	0,4609	$\bar{1}$,663607
42	5,5	12,87	1,109579	65	18,3	2,169	0,336260	88	31,1	0,4321	$\bar{1}$,635584
43	6,1	11,911	1,075948	66	18,8	2,007	0,302547	89	31,6	0,4051	$\bar{1}$,607562
44	6,6	11,024	1,042339	67	19,4	1,858	0,269046	90	32,2	0,3798	$\bar{1}$,579535
45	7,2	10,203	1,008728	68	20,0	1,719	0,235276	91	32,7	0,3561	$\bar{1}$,551572
46	7,7	9,442	0,975064	69	20,5	1,591	0,201670	92	33,3	0,3338	$\bar{1}$,523486
47	8,3	8,739	0,941462	70	21,1	1,473	0,168203	93	33,8	0,3130	$\bar{1}$,495544
48	8,8	8,088	0,907841	71	21,6	1,363	0,134496	94	34,4	0,2934	$\bar{1}$,467460
49	9,4	7,485	0,874192	72	22,2	1,261	0,100715	95	35,0	0,2751	$\bar{1}$,439491
50	10,0	6,928	0,840608	73	22,7	1,167	0,067071	96	35,5	0,2579	$\bar{1}$,411451
51	10,5	6,412	0,806994	74	23,3	1,080	0,033424	97	36,1	0,2417	$\bar{1}$,383277
52	11,1	5,934	0,773348	75	23,8	1,000	0,000000	98	36,6	0,2266	$\bar{1}$,355260
53	11,6	5,492	0,739731	76	24,4	0,9375	$\bar{1}$,971971	99	37,2	0,2125	$\bar{1}$,327359
54	12,2	5,083	0,706120	77	25,0	0,8789	$\bar{1}$,943940	100	37,7	0,1992	$\bar{1}$,299289

La capacité électrostatique par mille marin est approximativement

$$C = \frac{0,15163}{\log \frac{D}{d}} \text{ microfarads}$$

[1] J. Munro's and A. Jamieson's *Rules and Tables*, 1885.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

elle est donc plus faible de 1/5 environ que celle de la gutta ordinaire. Sa résistance mécanique à la traction est au contraire supérieure de 12 p. 100 environ à celle de la gutta ordinaire.

§ 2. — CAOUTCHOUC

PRODUCTION. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES ÉPURATION

L'importation du caoutchouc en Europe remonte aux premières années du XVIII^e^ siècle.

La Condamine, lors de sa mission au Pérou, en 1735, fit connaître le premier que cette substance est le produit de la dessiccation d'un suc laiteux qui s'écoule d'incisions pratiquées dans certaines espèces d'arbres : les indigènes recueillent ce suc dans des vases en terre ayant la forme de bouteilles qu'ils brisent lorsque le suc est solidifié.

Le caoutchouc le plus estimé provient des grandes plaines de l'Amérique du Sud qu'arrosent l'Amazone et ses principaux affluents : il est connu sous le nom de *caoutchouc de Para* et se trouve dans le commerce sous forme de bouteilles, de pains et de boules dites *têtes de nègres*. Les arbres qui le produisent sont des *siphonia* ou *hevea,* de la famille des euphorbiacées : on distingue parmi eux principalement le *siphonia elastica* ou *hevea guayanensis* (fig. 39) et le *siphonia* ou *hevea brasiliensis*.

Les autres espèces d'arbres à caoutchouc les plus répandues sont : le *castilloa elastica*, dont les produits, bien que de qualité inférieure, sont souvent mélangés avec le caoutchouc de Para et qui croît dans le Venezuela, la Nouvelle-Grenade, l'Equateur, le Pérou, à Panama, Costa-Rica, dans le Nicaragua, le Honduras et le Mexique; le *ficus elastica*, que l'on rencontre à Java, Madagascar, Assam et dans l'Australie ; l'*urceola elastica*, dont la zone d'habitat ne dépasse pas les limites de l'archipel Malais et que l'on trouve surtout à Bornéo, Sumatra et Penang. Cette dernière variété forme une sorte de plante grimpante analogue à la vigne, dont les rameaux, partis d'un tronc qui ne dépasse pas généralement la hauteur d'un homme, atteignent facilement, dans l'espace de cinq ans, 60 à 70 mètres de longueur ; elle fournit chaque année de 25 à 30 kilogrammes de caoutchouc. Le caoutchouc de Mozambique est le moins recherché ; il est enroulé par les indigènes sur de petits morceaux de bois et se présente sous la forme de fuseaux. A l'inverse de ce qui se pratique pour la gutta-percha, on se borne à entailler, sans les abattre, les arbres à caoutchouc et à placer sous chaque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

incision un récipient destiné à recueillir le suc qui s'en écoule : on en obtient environ un litre, par arbre, dans une matinée [1].

Le caoutchouc est une substance de couleur grisâtre, tenace, très élastique,

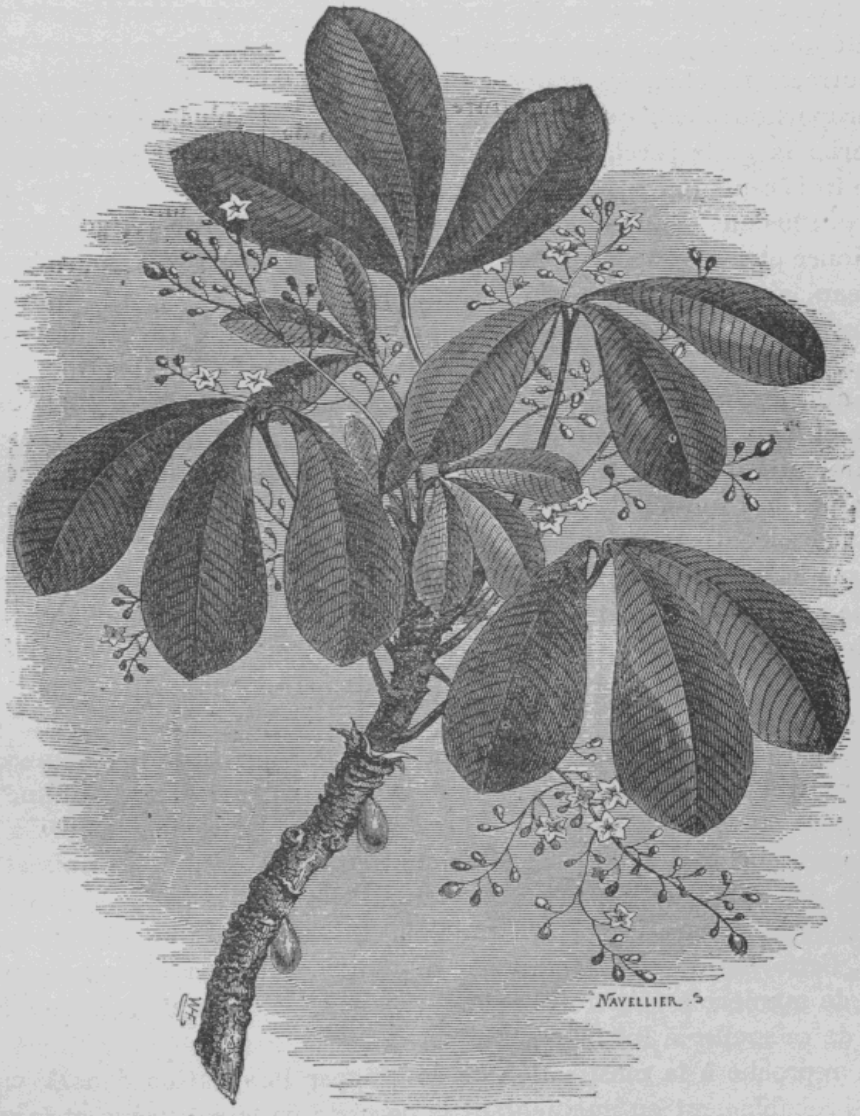


FIG. 59.

d'une densité un peu inférieure à celle de l'eau, 0,92 environ. Chauffé à 75 ou 80° il devient visqueux et fond à la température de 120°, en dégageant une odeur caractéristique ; à une température plus élevée, il brûle avec une

[1] La quantité de caoutchouc qui a été importée de la province de Para, en 1877, s'est élevée à 7340 tonnes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

flamme très brillante. Une fois fondu, il ne reprend plus, en se refroidissant, son état primitif et reste mou et gluant. Aussi ne peut-on pas le travailler de la même manière que la gutta-percha, pour le mouler ou l'appliquer à l'état pâteux sur les fils conducteurs. Le caoutchouc jouit de la propriété de se souder à lui-même, lorsque l'on presse l'une contre l'autre deux surfaces fraîchement coupées.

La proportion d'eau qu'absorbe le caoutchouc est plus grande que celle qu'absorbe la gutta-percha ; l'augmentation de poids, pour des plaques au bout de trois cents jours d'immersion, est de 10 à 25 p. 100 dans l'eau douce et de 3 p. 100 dans l'eau salée ; une plaque de gutta n'absorbe que 1,5 p. 100 d'eau douce et 1 p. 100 d'eau salée. Le caoutchouc est en outre un peu soluble dans l'eau, ainsi que le prouve la surface poisseuse des plaques que l'on a laissé séjourner pendant quelque temps dans l'eau. Le caoutchouc qui a subi le travail de la mastication est soluble dans l'éther, la benzine, l'huile de naphte, le sulfure de carbone, et insoluble dans l'alcool : les acides étendus et les alcalis, même concentrés, ne l'attaquent ni à la température ordinaire, ni à une température plus élevée. Le caoutchouc pur est, comme la gutta-percha, un simple carbure d'hydrogène ; celui que l'on trouve dans le commerce contient en outre de la résine, de l'eau et des cendres.

Comme la gutta-percha, le caoutchouc, exposé à l'air et à la lumière, se combine avec l'oxygène en se transformant en une résine blanchâtre ; cette altération est accélérée par les alternatives de sécheresse et d'humidité et se développe plus rapidement dans le produit manufacturé que dans le produit brut.

On prépare le caoutchouc en coupant les pains que livre le commerce en morceaux très minces, à l'aide d'un disque à bords tranchants animé d'un mouvement de rotation très rapide. Ces fragments, lavés et purifiés à l'eau froide, sont portés ensuite successivement entre des laminoirs unis et cannelés où ils sont mastiqués et constamment arrosés par un filet d'eau froide ; on obtient ainsi une pâte que l'on étire en une feuille de l'épaisseur voulue. Cette feuille est étendue sur une toile que l'on enroule sur elle-même, de manière à soustraire le caoutchouc au contact de l'air et à l'empêcher de se souder à lui-même.

On a reproché à la mastication de développer l'oxydation dans le caoutchouc, probablement en augmentant la porosité de la substance et la quantité d'air emprisonnée. Aussi les tranches de caoutchouc, lavées et purifiées, sont exposées quelquefois à une haute température sèche, de manière à faire évaporer toute l'humidité qu'elles contiennent. On les place alors sous une presse hydraulique qui en forme un bloc solide, qu'un couteau animé d'un double mouvement, l'un de va-et-vient parallèle à sa longueur et très rapide, l'autre perpendiculaire à la direction précédente et excessivement lent,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

débite en une feuille égale et continue de caoutchouc pur et naturel.

La mastication modifie, en outre, profondément les propriétés physiques et chimiques du caoutchouc ; elle lui fait perdre une grande partie de son élasticité et de sa ténacité et le rend entièrement soluble à froid dans les huiles minérales telles que la benzine, le naphte, etc. Le caoutchouc de Para brut, plongé dans ces liquides, se gonfle seulement, en conservant sa forme antérieure ; l'augmentation de volume peut atteindre jusqu'à cent fois le volume primitif [1].

VULCANISATION

Sous l'influence de la chaleur, le caoutchouc se combine avec le soufre, en diverses proportions, et donne naissance à des corps jouissant de propriétés particulières. Lorsque la quantité de soufre varie de 3 à 6 p. 100 et que la température à laquelle on porte le mélange pendant deux heures ne dépasse pas 140° C., le caoutchouc est dit *vulcanisé*. Il conserve alors sa souplesse à de basses températures, résiste beaucoup mieux à la chaleur, ne s'oxyde pas à l'air, est plus élastique et absorbe moins d'eau ; il est, en outre, insoluble dans les dissolvants ordinaires du caou[illegible] mais se dissout dans l'huile de térébenthine bouillante.

La vulcanisation peut se faire en plongeant le caoutchouc dans un bain de soufre fondu, à 120° : le caoutchouc se gonfle, quoique beaucoup moins que dans la benzine ou le naphte, et absorbe, à la longue, près de la moitié de son poids de soufre. Si l'on porte ensuite graduellement la température à 135 ou 140°, une partie du soufre entre en combinaison avec le caoutchouc. La vulcanisation est complète si l'on maintient le caoutchouc à cette température pendant deux heures ou si on le plonge dans un bain de glycérine chauffé à 140° pendant un temps même plus court.

Ce procédé, excellent dans les laboratoires, ne peut convenir aux applications industrielles. Dans les usines, on saupoudre de fleur de soufre, de temps à autre, le caoutchouc pétri à chaud dans un masticateur, jusqu'à ce que le mélange des matières soit bien intime ; on le porte ensuite dans un four en fer de dimensions variables, appelé *vulcanisateur* (fig. 60) et chauffé à la vapeur. La température du four s'estime d'après la pression de la vapeur observée sur des manomètres.

On n'obtient une vulcanisation parfaite qu'en incorporant mécaniquement au caoutchouc un excès de soufre ; d'un autre côté, le soufre qui ne s'est pas combiné forme des efflorescences à la surface du caoutchouc,

[1] *Journal of the Society of Arts*, 1880. *Cantor lectures*, by Thomas Bolas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

devient acide et détériore la substance. On évite cet inconvénient en remplaçant la fleur de soufre par 15 à 20 p. 100 de sulfure d'antimoine obtenu en faisant bouillir du sulfure natif dans une solution de soude caustique et

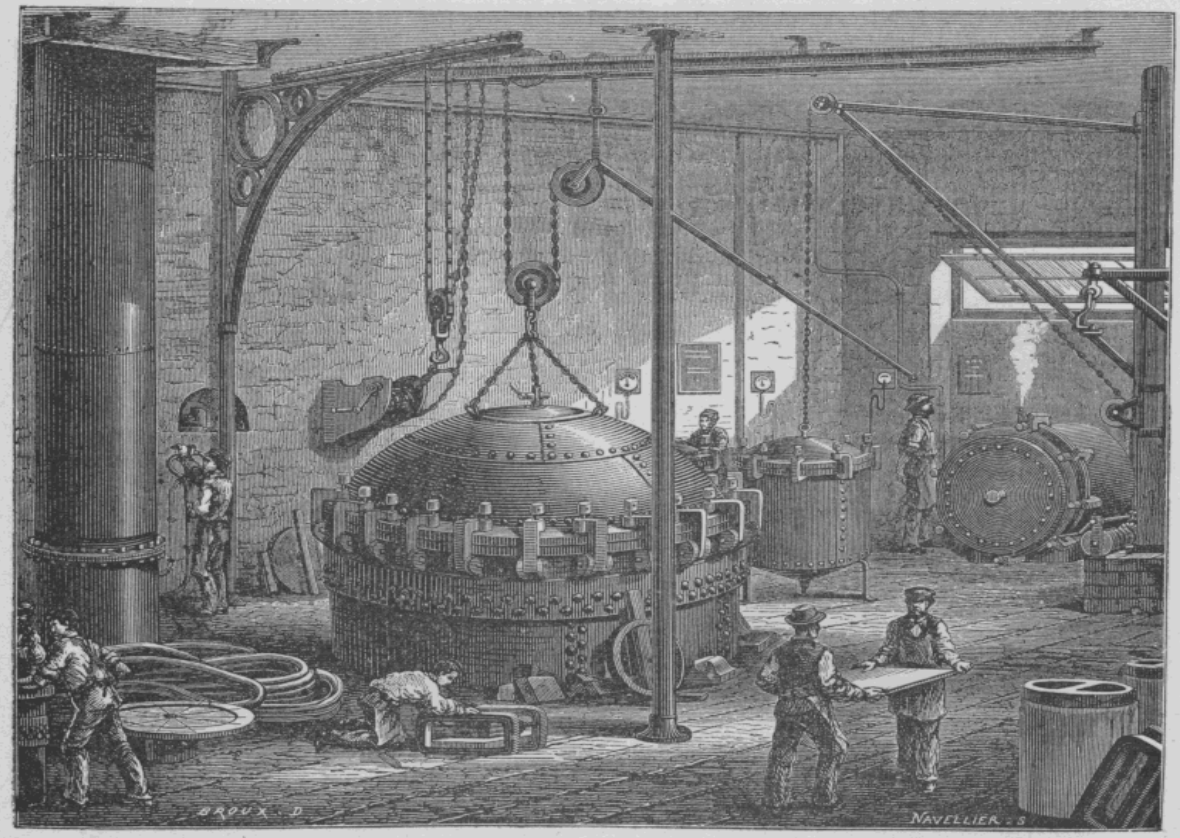


FIG. 60.

précipitant le mélange par un excès d'acide chlorhydrique. Le sulfure doit contenir 20 à 25 p. 100 de soufre libre ; on en ajoute, en cas de besoin. Les tubes et autres objets, en caoutchouc de qualité supérieure, bien reconnaissables à leur couleur rouge brique, sont fabriqués de cette manière.

Lorsque la proportion de soufre atteint 25 à 50 p. 100, le caoutchouc devient remarquablement plastique et peut être moulé en toutes espèces de formes. Si on y incorpore, en outre, 3 p. 100 de noir de fumée et autant de magnésie calcinée, et si on vulcanise le mélange, à la vapeur, à la température de 135°, pendant six, huit ou dix heures, suivant l'épaisseur du caoutchouc, on obtient une substance dure, noire, mauvaise conductrice de la chaleur et surtout de l'électricité, inerte vis-à-vis de la majeure partie des produits chimiques, et susceptible de prendre un beau poli. Cette substance,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nommée *ébonite*, trouve de nombreuses applications dans l'industrie pour la fabrication de vases de piles, de caractères d'imprimerie, de manches de robinets d'appareils à vapeur, etc. ; elle est employée également dans la construction de certains instruments de physique et de télégraphie. Chauffée à 100°, elle prend une certaine flexibilité qui en rend le travail plus facile.

On peut obtenir l'ébonite avec une proportion moindre de soufre, en chauffant le mélange plus longtemps, ou en portant la température jusque vers 150°, mais pendant un temps sensiblement plus court. Si l'on chauffe jusque vers 160 ou 170°, des gaz commencent à se produire et, en se dégageant à travers la masse, laissent une ébonite spongieuse, de qualité très inférieure. La chaleur doit, dans tous les cas où l'on vulcanise le caoutchouc, être appliquée graduellement à partir de 110 ou 115° : il est également essentiel de diminuer par degrés la pression de la vapeur, lorsque la vulcanisation est terminée.

Les objets destinés à être convertis en ébonite sont généralement noyés dans un lit de plâtre de Paris ou de chaux en poudre. Souvent il est nécessaire de les soutenir, dans ce lit même, par des supports en étain ou en verre ; les surfaces de contact sont recouvertes d'une très légère couche de graisse ou mieux de cire, pour empêcher l'adhérence du caoutchouc au support.

Suivant les besoins de l'industrie, on incorpore au caoutchouc, avant de le vulcaniser, dans des proportions variables pouvant atteindre 60 p. 100, beaucoup d'autres substances, telles que l'argile, la chaux, le plâtre de Paris, le sulfure de zinc, le sulfate et divers oxydes de plomb, la magnésie, la silice, la terre de Fuller, l'huile de lin, etc.

La découverte de la vulcanisation du caoutchouc, qui a placé ce produit, après le coton et le chanvre, au premier rang de ceux que l'industrie tire du règne végétal, est due à Charles Goodyear [1].

REVÊTEMENT DES CABLES EN CAOUTCHOUC. — CABLES HOOPER

Pour fabriquer un câble à enveloppe de caoutchouc, on enroulait autrefois un ruban de cette matière en hélice autour du fil conducteur, chaque spire recouvrant la précédente ; on en assurait la jonction, en mouillant le tout avec de l'huile de naphte. Plus tard, M. Silver plongea le fil recouvert pendant une demi-heure dans de l'eau bouillante. Le procédé suivant (fig. 61),

[1] Cet infortuné fut dépouillé traîtreusement de ses droits d'inventeur au moment même où il cherchait à s'en assurer la propriété légale en Angleterre (Thomas Bruce Warren *The telegraphic Journal*, vol. V).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dû à MM. Siemens, donne de meilleurs résultats : on dispose longitudinalement, de chaque côté du conducteur en cuivre, deux rubans de caoutchouc dont les bords, coupés par des couteaux circulaires, sont rapprochés en passant entre deux cylindres et se soudent immédiatement l'un à l'autre. Lorsque l'on applique plusieurs couches concentriques, les soudures de chaque couche sont placées à angle droit par rapport à celles de la couche précédente.

Lorsque l'on veut recouvrir le conducteur de caoutchouc vulcanisé, on découpe une feuille de caoutchouc ordinaire préalablement saupoudrée de fleur de soufre, en bandelettes qu'on enroule en hélice autour du fil de cuivre, de manière à former une gaîne d'épaisseur convenable. On la maintient en place à l'aide d'enveloppes de calicot et on porte le câble dans un vulcanisateur, où il est chauffé à la vapeur à 140° pendant quelques heures.

On évite facilement l'altération que subit le caoutchouc au contact du cuivre, en étamant le fil métallique. Mais on n'a pu obtenir l'adhérence du conducteur au diélectrique. MM. Siemens ont essayé d'enduire le cuivre de composition Chatterton et, pour empêcher les joints longitudinaux de se rouvrir, ils ont appliqué une seconde couche de Chatterton et une couche de gutta par-dessus le caoutchouc. Malheureusement ce dernier devenait visqueux et, en se dilatant, tendait à crever l'enveloppe de gutta. On a essayé aussi la disposition inverse, c'est-à-dire que l'on a recouvert le fil de cuivre d'abord de gutta, puis de caoutchouc vulcanisé et enfin d'un ruban caoutchouté. Mais les câbles isolés au caoutchouc qui ont donné les meilleurs résultats sont ceux de M. W. Hooper ; ils ont été employés sur la plupart des lignes de la *Great Northern C°* et sont construits de la manière suivante.

Un toron de fils de cuivre étamés est recouvert de deux rubans de caoutchouc pur, enroulés en hélice et en sens inverse l'un de l'autre ; sur ces deux couches on applique, encore en hélice, une bande de caoutchouc auquel on a incorporé mécaniquement 25 p. 100 d'oxyde de zinc et que M. Hooper désigne sous le nom de *séparateur*. On enferme le fil recouvert de ces trois premières couches, entre deux lanières longitudinales de caoutchouc contenant 6 p. 100 de soufre et 10 p. 100 de sulfure de plomb ; ces lanières sont recoupées et pressées l'une contre l'autre suivant la méthode indiquée par M. Siemens. Le tout est emprisonné dans une chemise en coton feutré, appliquée en hélice et destinée à maintenir en place les diverses bandes de caoutchouc durant l'opération de la cuisson. Le fil ainsi formé est porté dans de grands cylindres en tôle où il est soumis, pendant quatre heures, à une température de 140° C., qui vulcanise les deux couches extérieures de caoutchouc et consolide le tout : les couronnes de fil sont noyées, durant cette opération, dans un lit de plâtre en poudre, afin de faire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pénétrer la chaleur également et en même temps dans toute la masse du câble et d'empêcher l'adhérence des diverses spires entre elles, dans le cas où le caoutchouc deviendrait gluant. Le séparateur a pour but de limiter la vulcanisation du caoutchouc aux couches extérieures : toutefois, une très

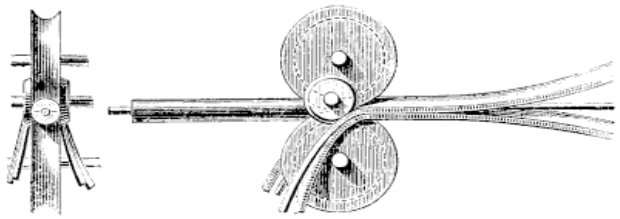


FIG. 61.

petite quantité de soufre paraît néanmoins arriver, en traversant le séparateur, jusqu'au caoutchouc pur, et pénètre ensuite, de proche en proche, jusqu'aux couches immédiatement en contact avec le conducteur en cuivre.

La densité moyenne de la matière qui forme l'enveloppe isolante des câbles de M. Hooper est de 1,175 : un mille marin de l'âme de ces câbles pèse en conséquence environ

$$1,753\ (D^2 - d^2) \text{ kilogrammes}$$

D et d représentant en millimètres le diamètre extérieur du diélectrique et celui du conducteur en cuivre.

La résistance d'isolement d'une âme en caoutchouc Hooper, à 24° C., et par mille marin, est approximativement de

$$4,3 \log \frac{D}{d} \times 10^4 \text{ megohms}$$

Elle varie des 0,026 de sa valeur par degré Fahrenheit ; elle diminue de moitié ou au contraire est doublée, lorsque la température s'élève ou s'abaisse de 27° F. à partir d'un point quelconque de l'échelle thermométrique.

La capacité électrostatique du caoutchouc Hooper est de

$$\frac{0,14854}{\log \frac{D}{d}} \text{ microfarads}$$

lorsque le conducteur est formé d'un seul fil plein ; s'il comprend un toron de plusieurs fils, cette capacité devient

$$\frac{0,14854}{\log \sqrt{1 + 3,7 \frac{P}{p}}}$$

P et p désignant les poids, par nœud, du diélectrique et du fil de cuivre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ALTÉRATIONS DU CAOUTCHOUC

Le caoutchouc, n'étant pas attaqué par les animaux sous-marins, semblerait devoir, grâce à ses propriétés électriques remarquables, former l'enveloppe isolante par excellence des câbles sous-marins. Il est malheureusement sujet à des altérations dont la nature intime n'est pas encore bien connue et qui sont d'autant plus difficiles à étudier que des câbles, d'une composition en apparence identique, placés côte à côte dans des conditions absolument semblables, donnent des résultats complètement différents.

Ainsi, des câbles de torpilles, en caoutchouc vulcanisé de part en part, à sept conducteurs et armés de fer, ont été trouvés gravement détériorés, par places, après dix-huit mois d'immersion [1]. Aux points avariés, le diélectrique était devenu poreux et se laissait traverser par l'eau : aussi l'isolement de quelques-uns des fils était devenu bien inférieur à celui d'autres fils faisant partie du même câble. La vulcanisation, au moins telle qu'elle se pratique aujourd'hui, ne peut donc donner de résultats certains, quant à la permanence des propriétés isolantes du caoutchouc.

D'un autre côté, des câbles du système Hooper, les uns enveloppés de toile et destinés au service télégraphique de campagne, les autres armés de fer et préparés pour l'inflammation des torpilles, ont été conservés en magasin, *à l'air*, pendant dix ans et sont restés en excellent état. D'autres câbles tout à fait semblables, conservés dans les mêmes magasins, les uns dans des cuves remplies d'eau, et les autres à l'air, côte à côte avec les premiers, se sont comportés tout différemment. Aux extrémités des câbles immergés, sur une longueur de quelques décimètres laissée à l'air pour la commodité des essais électriques, la couche intérieure de caoutchouc pur était devenue visqueuse et découlait des bouts : l'altération s'arrêtait brusquement à l'endroit où le câble entrait dans l'eau, montrant ainsi qu'elle était due à l'oxydation par l'air et non au contact du caoutchouc avec le cuivre. La même exsudation visqueuse fut remarquée aux extrémités des câbles Hooper, armés en fer et conservés à l'air ; mais dans ceux-ci, l'altération s'étendait sur une bien plus grande longueur. Comme il est impossible d'admettre que l'oxygène atmosphérique ait pu pénétrer si loin par les extrémités du câble et que la nature visqueuse du produit semble encore devoir empêcher cette énétration au delà d'une petite distance, si l'altération du caoutchouc est réellement le résultat d'une oxydation, il faut admettre que l'oxygène ait accès dans l'intérieur du diélectrique, en traversant la substance même du

[1] Discours de M. le professeur Abel, président de la Société des Ingénieurs des télégraphes à Londres, en 1877.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

câble. Les recherches de Graham sur l'absorption et la dialyse des gaz par les substances colloïdes prouvent, non seulement que cette pénétration est possible, mais qu'elle existe certainement : d'une part, en effet, Graham, à l'aide du vide, forçait de l'air très riche en oxygène à filtrer à travers un tube épais de caoutchouc; d'autre part, il avait reconnu que l'oxygène est deux fois plus soluble dans le caoutchouc que dans l'eau, à la température ordinaire. Ce gaz, arrivant par les parois de la couche externe de caoutchouc vulcanisé dans le câble Hooper, pénètre peu à peu jusqu'au caoutchouc pur, et quand celui-ci a commencé à s'oxyder, l'absorption du gaz par la couche externe va en croissant par le fait même de l'assimilation continuelle de l'oxygène par la couche interne, comme par une sorte d'aspiration. Il en résulte que si un câble de ce genre reste exposé à l'air pendant un temps même assez court avant son immersion, le caoutchouc peut être déjà gravement atteint.

Il resterait à expliquer pourquoi des câbles dont le diélectrique a été préparé par les mêmes procédés et qui ont été conservés dans l'air à côté les uns des autres, exactement dans les mêmes conditions, se comportent si différemment, la portion non vulcanisée du caoutchouc ne présentant dans les uns pas la moindre trace d'altération, même aux extrémités, tandis que dans les autres elle est transformée en un produit visqueux sur une plus ou moins grande longueur. M. Hooper admet que le séparateur n'agit pas d'une façon absolue et qu'une petite quantité de soufre le traverse généralement, pendant la vulcanisation, pour arriver jusqu'à la couche interne de caoutchouc : dans des cas accidentels, et pour des motifs qui restent encore inconnus, cette pénétration ne se produirait pas, et c'est alors que le caoutchouc, resté absolument pur, serait décomposé en tous les points où l'air atmosphérique aurait libre accès à la partie extérieure du câble.

Quelques auteurs considèrent le produit visqueux comme une simple modification isomérique du produit fibreux, se produisant dans des conditions encore mal déterminées. Le produit visqueux préexisterait dans le caoutchouc ordinaire qui lui devrait sa propriété de se souder à lui-même, lorsque l'on rapproche l'une de l'autre des surfaces fraîches [1].

La transformation du caoutchouc en un produit visqueux, semi-fluide, ne semble pas, jusqu'à présent, avoir pour effet d'affaiblir l'isolement des câbles. Cependant ce produit peut, à la longue, exercer une action dissolvante sur la couche externe de caoutchouc vulcanisé, et doit d'ailleurs nuire à la constitution mécanique des câbles.

L'emploi des câbles en caoutchouc a été, en grande partie, limitée jusqu'à ce jour aux climats chauds. Cette substance ne se ramollissant pas en effet,

[1] *Cantor lectures*, by Thomas Bolas, loc. cit.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lorsqu'elle est chauffée modérément, le conducteur en cuivre ne risque pas de se décentrer ; ses qualités isolantes sont, d'un autre côté, bien moins affaiblies que celles de la gutta-percha, sous l'influence d'une élévation de température.

§ 3. — AUTRES ISOLANTS

Un grand nombre d'autres substances ont été proposées pour remplacer, dans la fabrication des câbles, la gutta-percha et le caoutchouc, en vue d'obtenir des isolants plus économiques ou résistant mieux à l'oxydation, aux variations de température, aux attaques des insectes et aux autres causes de destruction de ces matières.

Plusieurs de ces substances présentent au début des qualités électriques remarquables, mais on n'a trouvé chez aucune d'elles jusqu'à présent l'inaltérabilité presque indéfinie que l'on rencontre chez la gutta-percha, conservée sous l'eau.

Il ne semble donc pas que la gutta-percha ou le caoutchouc doivent cesser, dans un avenir prochain au moins, de former l'enveloppe isolante des câbles sous-marins. Nous examinerons néanmoins les principales substances que l'on a proposé à diverses reprises de leur substituer.

COMPOSITION WRAY

Cette composition est un mélange de gomme laque, de caoutchouc, de silex ou d'alun pulvérisé et d'un neuvième de gutta-percha. Elle fond à une température notablement plus élevée que la gutta, ce qui permet de l'employer dans les pays chauds. La chaleur la rendant bien plastique, on peut l'appliquer sur les fils de cuivre de la même manière que la gutta : d'un autre côté, les bords fraîchement coupés de cette substance se soudent naturellement à eux-mêmes, sous l'action d'une petite pression ; on peut donc aussi recouvrir un fil de composition Wray, suivant le procédé indiqué par M. Siemens pour la fabrication des câbles en caoutchouc pur. Ses propriétés électriques ne sont que très peu inférieures à celles du caoutchouc ; elle donne même un isolement supérieur à celui de cette substance, lorsque l'on diminue la proportion de gutta-percha ; au contact du cuivre, elle ne subit aucune altération. La composition Wray est malheureusement attaquée par l'eau de mer et ne peut être employée pour les câbles sous-marins, au moins à la surface extérieure du diélectrique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PARAFFINE, OZOKÉRITE

La paraffine est un des produits de la distillation de certaines espèces de houilles et de bitumes; on la trouve aussi dans certaines variétés d'huiles minérales et de pétrole. Elle a un pouvoir isolant élevé, mais sa nature très cassante ne permet pas de la faire entrer directement dans la fabrication des câbles. On s'en sert seulement pour préserver temporairement du contact de l'air les extrémités des fils recouverts de gutta-percha ou de caoutchouc qui

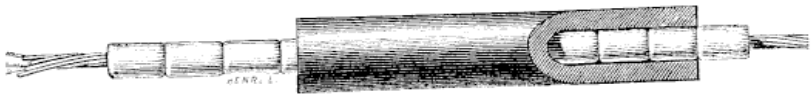


Fig. 62.

servent aux communications des appareils électriques. A cet effet, on trempe un instant les bouts de ces fils dans de la paraffine que l'on fait fondre préalablement dans une petite bassine; en renouvelant l'opération cinq ou six fois, les extrémités sont recouvertes d'une enveloppe blanche de paraffine solide qui les garantit contre toute déperdition d'électricité par la surface.

M. Fortin-Hermann obtient des fils bien isolés et d'une très faible capacité inductive, en enfilant dans des conducteurs en cuivre, à la suite les unes des autres, de petites perles en bois imbibées de paraffine (fig. 62) : les conducteurs sont recouverts ensuite d'un fort tube en plomb. Ces câbles donnent d'excellents résultats à terre, pour la transmission des sons par le téléphone notamment, mais, en raison même de leur constitution, ne semblent pas pouvoir jamais être employés pour la télégraphie sous-marine.

L'ozokérite, qui a été soumise dans ces dernières années à de nombreux essais, n'est que de la paraffine à l'état natif : on la désigne aussi sous le nom de *cire fossile*. Combinée avec de petites quantités de caoutchouc, l'ozokérite donne des produits plus mous et plus plastiques que cette substance et qui peuvent rivaliser avec elle comme isolement et comme capacité inductive. M. Henley emploie l'ozokérite comme isolant dans les câbles de la manière suivante : le conducteur, en cuivre étamé, est recouvert d'abord de caoutchouc pur, ensuite d'une composition séparative grise, puis d'une composition noire, tenues secrètes encore toutes deux, et enfin d'ozokérite pure; l'âme est enveloppée d'une couche de feutre que l'on imbibe d'ozokérite. L'isolement de ces câbles paraît s'élever jusqu'à 5000 megohms par mille marin, après cinq minutes d'électrification et vingt-quatre heures d'immersion dans l'eau à 24° C.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

NIGRITE

En mastiquant ensemble, à la plus basse des températures nécessaires pour les amener à l'état plastique, du caoutchouc et de la *cire noire* qui n'est que le résidu fourni par la distillation partielle de l'ozokérite, on obtient une substance mécaniquement supérieure à la gutta-percha, moins sensible à l'action de la chaleur que le caoutchouc, possédant un pouvoir isolant supérieur à celui de la gutta, et une capacité inductive notablement inférieure. MM. Clark, Muirhead et C^ie^ en ont fabriqué des câbles de torpilles qui, pendant plusieurs années, paraissent avoir donné de bons résultats.

KÉRITE

La kérite paraît être un mélange du produit de l'oxydation des huiles siccatives, telles que les huiles de lin, de noix, de graines de coton, etc., avec du caoutchouc vulcanisé et un certain nombre d'autres matières, ozokérite, silice, etc. La kérite résiste bien à l'air et à la chaleur : en Egypte, un câble, isolé avec cette matière, a supporté sans altération, pendant tout un été, dans le désert, une température de 56° C.

Immergée dans l'eau, la kérite se conserve parfaitement et n'est attaquée ni par les teredos, ni par les autres animaux sous-marins.

Aux États-Unis, des fils enduits de kérite, placés dans le tunnel sous-fluvial de Chicago, où ils étaient alternativement humides et secs, ont bien fonctionné pendant plusieurs années.

Des câbles en kérite ont été placés à Paris dans des égouts où certaines usines déversent des eaux à une haute température. Une partie de ces câbles résiste depuis plusieurs années, en conservant des isolements élevés : une autre partie a dû être relevée.

L'action des principaux agents chimiques, acides, bases et sels, est à peu près la même sur la kérite que sur la gutta-percha : cependant les huiles de houille et de térébenthine et le gaz d'éclairage attaquent plus facilement la kérite qui, en revanche, présente plus d'élasticité et de fermeté que la gutta.

Le pouvoir isolant de la kérite est moitié environ de celui de la gutta, entre 20 et 33° C. : il diminue ensuite plus rapidement que celui de la gutta. Sa capacité inductive, rapportée à celle de l'air, est de 1,7 environ.

En raison du soufre qui entre dans la composition de la kérite, les conducteurs en cuivre des câbles isolés avec cette substance doivent être étamés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CAOUTCHOUC DE M. BRUCE WARREN

M. Thomas Bruce Warren, après avoir reconnu que le brome, l'iode et le chlore, au lieu d'oxyder le caoutchouc au contact de l'eau, produisent un effet tout à fait différent, a essayé d'utiliser cette propriété dans la fabrication des câbles. A cet effet, le fil de cuivre est recouvert de deux couches de caoutchouc qui sont consolidées d'abord dans de l'eau bouillante, et plongées ensuite dans une dissolution d'iode dans de l'iodure de potassium, ou de brome dans du bromure de potassium, ou exposées à l'action du chlore. Le caoutchouc ainsi traité peut être soumis à une température assez élevée sans se détériorer : il résiste également bien à l'action de l'air et n'est plus attaqué par ses dissolvants ordinaires, bien que l'analyse chimique ne puisse y révéler la présence d'iode, de brome ou de chlore libre. Ne contenant pas de soufre, il n'attaque pas le cuivre qui, dès lors, n'a pas besoin d'être étamé ; soumis à une tension, il s'allonge d'une façon permanente comme le cuivre qui ne peut, dans ces conditions, faire de saillies dans son enveloppe isolante, lorsque la traction à laquelle le câble est soumis vient à disparaître. Au point de vue électrique, les qualités du caoutchouc paraissent plutôt exaltées encore par ce traitement.

CABLES DE LA SOCIÉTÉ BERTHOUD-BOREL ET C^ie^

Le conducteur en cuivre, recouvert d'une ou plusieurs couches de coton, chanvre ou autre substance textile, est plongé dans un bain de matière isolante liquide chauffé à 180° C. Cette matière isolante est un mélange d'huile de lin, oxydée d'une matière spéciale, avec de la résine : les proportions du mélange varient suivant les effets que l'on veut obtenir. L'âme ainsi formée est enveloppée de deux gaînes de plomb concentriques entre lesquelles on interpose une couche mince de brai gras, résidu de la distillation du goudron de gaz : des précautions particulières sont prises pour éviter, autant que possible, tout contact de l'air avec la surface extérieure du diélectrique, durant la fabrication, afin d'en éliminer toute trace d'humidité.

Les premiers essais qui ont été faits de ces câbles, dans les égouts de Paris, en 1884, n'ont pas été très heureux ; mais les perfectionnements qui ont été apportés depuis lors à leur fabrication semblent avoir donné des résultats plus satisfaisants, et de nombreuses applications en ont été faites dans divers pays. La matière isolante des câbles du système Berthoud,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Borel et C^ie^, pouvant supporter, sans subir aucune altération, des températures très élevées, ces câbles seraient particulièrement propres à la transmission de la force et à l'éclairage électrique.

CABLES BROOKS

Ces câbles ont été composés d'abord de conducteurs en cuivre, en nombre variable, entourés séparément de chanvre, réunis en faisceaux et enfermés dans une conduite remplie de pétrole.

Depuis quelques années, M. Brooks emploie, comme diélectrique, un composé de résine et d'une huile résineuse qui est à l'état solide à la température ordinaire. L'isolement de ces câbles est extrêmement élevé : divers échantillons essayés en Angleterre, à plusieurs mois d'intervalle, ont donné régulièrement un isolement de 19000 megohms par mille [1].

[1] *Journal of the Society of telegraph Engineers and Electricians*, vol. XVI, p. 429.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE III

REVÊTEMENT EXTÉRIEUR

§ 1er. Chanvre. — Préparation. — Résistance mécanique. — Machine à recouvrir les âmes de chanvre.
§ 2. Armature en fer. — Essais des fils de fer à la traction, à la torsion. — Machines à recouvrir d'une armature en fils de fer les câbles de grands fonds, intermédiaires, d'atterrissement.
§ 3. Enveloppes de toile et composition bitumineuse.

§ 1er. — CHANVRE

L'âme des câbles, formée du conducteur en cuivre et de son enveloppe isolante, est recouverte généralement de deux couches de chanvre enroulées en hélice et en sens inverse l'une de l'autre. Ce matelas a pour but, d'une part, de protéger le diélectrique contre les avaries auxquelles l'exposerait le contact immédiat des fils de fer de l'armature extérieure, et, d'autre part, d'augmenter le diamètre du cylindre sur lequel sont appliqués ces fils de fer, de telle sorte que le nombre en puisse être suffisant pour donner au câble la résistance mécanique désirée.

Lorsqu'il est immergé dans de l'eau de mer, le chanvre peut être considéré pratiquement comme indestructible : des cordages qui y avaient séjourné pendant quatre-vingts ans en ont été retirés en aussi bon état que lorsqu'ils étaient neufs. Les fibres de chanvre, et surtout celles du chanvre de Manille, sont détruites peu à peu lorsqu'elles se trouvent dans l'eau en contact avec des fils de fer : cet effet est moins prononcé avec le chanvre de Russie.

Certains animaux qui vivent dans la mer, même à des profondeurs supérieures à 1000 brasses, tels que la *limnoria* et le *teredo*, rongent le chanvre et le font entièrement disparaître au bout de très peu de temps, lorsque, par suite de la destruction des fils de fer, due à une action soit mécanique soit chimique, il est exposé à nu à leurs attaques ; dans les parties voisines où l'armature en fer existe encore, le chanvre reste intact.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le chanvre dont on recouvre les âmes des câbles était autrefois saturé de goudron. On avait pensé que l'eau contenue mécaniquement dans les pores de la gutta-percha, devant s'évaporer peu à peu, par suite des variations de température auxquelles les câbles sont soumis, le goudron dont le chanvre était imbibé se substituerait petit à petit à cette eau et arriverait à remplir tous les interstices de la gutta-percha dont les propriétés isolantes se trouveraient ainsi augmentées. Les inconvénients, résultant de l'application aux câbles d'une chaleur relativement même modérée, n'étant pas encore connus à cette époque, on faisait passer l'âme recouverte de chanvre à travers un bain de goudron fondu, dont la température ne pouvait être inférieure à 38° C., qui représente celle de la fusion du goudron. Le goudron de Stockholm contenant, d'un autre côté, toujours une certaine quantité de créosote qui est, comme on sait, un dissolvant de la gutta-percha, ces deux causes réunies amenaient nécessairement dans l'isolement des câbles une baisse qui ne devait pas être inférieure à 20 ou 30 p. 100. Le goudron bouchant, en outre, temporairement les petites fissures qui peuvent se produire à la surface de la gutta, pendant la fabrication du câble, masque de petits défauts au moment où il est aisé de les réparer; ces défauts ne deviennent apparents ensuite que quelque temps après la pose, lorsque le goudron a été, en partie au moins, lavé par l'eau de mer. On a renoncé, pour tous ces motifs, à l'emploi du goudron et on préfère se servir de chanvre ou de jute que l'on a fait macérer, pendant un jour ou deux, dans une décoction de tannin. On applique même le chanvre tanné à l'état humide sur l'âme, afin de faciliter la découverte des fuites qui viennent à se produire dans l'enveloppe isolante.

On a essayé aussi de remplacer le goudron par la paraffine, mais cette substance est trop cassante. On obtient aujourd'hui de bons résultats avec l'ozokérite, qui, par sa souplesse et sa plasticité, est d'une application facile et augmente même l'isolement de 10 à 12 p. 100, lorsque l'enveloppe de chanvre ozokérité est bien serrée contre l'âme. En raison de la température assez élevée à laquelle l'ozokérite entre en fusion, on ne peut, comme pour le goudron, faire passer dans la matière liquide le fil garni de son enveloppe de chanvre. On recouvre alors l'âme d'un ruban de toile qu'on a plongé préalablement dans de l'ozokérite fondue, à laquelle on ajoute un peu de poix de Stockholm, pour donner du corps à l'enduit et boucher tous les pores du ruban. L'enroulement ne se fait que lorsque le ruban est entièrement refroidi.

Des cordages en chanvre, tirés à travers un bain de goudron fondu, résistent immédiatement après à une traction qui est de 25 p. 100 environ plus faible que celle à laquelle résistent des cordages semblables non goudronnés. La raison en est que les fibres du chanvre sont en partie détruites

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par le goudron fondu et que celui-ci, agissant comme un lubrifiant, permet aux fibres de glisser plus facilement les unes sur les autres. On doit donc éviter l'emploi du goudron, *dans ces conditions*, même pour la fabrication des simples cordages en chanvre et en fils de fer destinés aux opérations de dragages et d'immersion de bouées.

Une corde en chanvre de Manille, pesant 25 grammes par brasse, se rompt sous une charge de 190 kilogrammes, en s'allongeant de 2,6 p. 100 de sa

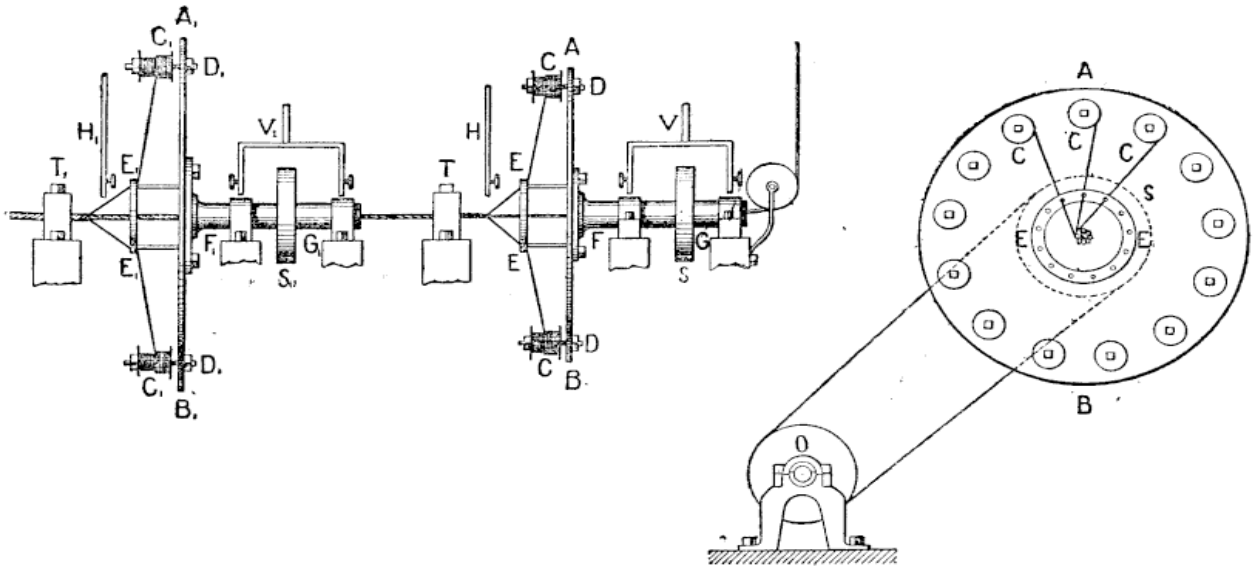


FIG. 63.

longueur. Elle est de 25 à 30 p. 100 plus faible qu'une corde semblable en chanvre blanc de Russie et par suite de même force que cette dernière corde goudronnée.

Un mètre cube de chanvre de Russie ou d'Italie pèse environ 620 kilogrammes, un mètre cube de chanvre de Manille 650 kilogrammes, un mètre cube de chanvre goudronné 900 kilogrammes.

La machine à recouvrir de chanvre ou de jute les âmes des câbles (fig. 63) se compose d'un axe creux F G, sur lequel est monté un plateau en tôle A B percé de trous à la périphérie : on engage dans ces trous les tiges qui portent les bobines C couvertes de jute et on les maintient en place à l'aide d'un écrou D que l'on visse, sans le serrer à bloc, sur la face postérieure du plateau, afin que la bobine puisse tourner facilement. Un anneau creux E, percé de trous en nombre égal à celui des bobines, est fixé au plateau par quatre tiges en fer et suit conséquemment son mouvement. Les brins de jute, après avoir quitté les bobines, passent à travers les trous de l'anneau E ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de là, ils vont s'appliquer sur l'âme qui traverse l'axe creux F G et qui est sollicitée à se mouvoir dans le sens de sa longueur.

Les fils au point où ils viennent envelopper l'âme, traversent un *toupin* T, sorte de collier en fer divisé en deux parties qui sont munies chacune de deux oreilles plates ; des bandes de caoutchouc, destinées à donner une certaine élasticité au système, sont interposées entre les oreilles que l'on boulonne les unes sur les autres. Le diamètre intérieur du collier est égal à celui de l'âme recouverte de chanvre : on le règle dans chaque cas particulier. Quelquefois les deux parties du toupin sont mobiles autour d'une charnière (fig. 64) et la moitié supérieure n'est maintenue qu'à l'aide d'un contrepoids.

Fig. 64.

Un petit tuyau H muni d'un robinet permet de laisser tomber sur l'âme, au moment où elle reçoit sa première couche de chanvre, un filet d'eau destinée à entretenir l'humidité de la gutta et à humecter les matières textiles. Le plateau reçoit d'un arbre de couche O un mouvement de rotation autour de l'axe creux ; cette rotation, combinée avec le mouvement de progression en avant du câble, détermine l'enroulement en hélice des fils de chanvre. La rotation du plateau étant très rapide, des tuyaux V, versent constamment de petits filets d'eau sur les paliers qui soutiennent l'arbre F G, pour en éviter l'échauffement. Un frein, formé d'un sabot en bois fixé à l'extrémité d'un levier, peut être serré contre le plateau A et permet d'en arrêter rapidement le mouvement en cas de besoin.

L'âme passe ensuite dans une seconde machine exactement semblable à la première, mais tournant en sens inverse de celle-ci, pour y recevoir sa seconde couche de jute.

§ 2. — ARMATURE EN FER

L'âme, entourée de chanvre, est généralement recouverte d'une enveloppe de fils de fer, destinée à la protéger contre les causes d'avaries extérieures et à lui donner la résistance mécanique nécessaire pour pouvoir supporter le relèvement, à toutes profondeurs, en cas de réparations. Aux abords des côtes, dans les eaux peu profondes, les câbles sont exposés à être dragués par les ancres des navires et les engins de pêche ; dans les hautes latitudes ils ont parfois à supporter le choc des *icebergs* ou montagnes de glace flottantes ; l'agitation incessante de la mer enfin, due aux vents, aux courants,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au flux et au reflux de la marée, détermine un ragage ininterrompu des câbles sur le fond de la mer et les détruit rapidement, surtout lorsque le sol est rocailleux. Dans les grandes profondeurs, les câbles, lorsqu'ils sont posés avec un mou suffisant pour leur permettre d'épouser toutes les sinuosités du sol, ne sont exposés à aucune de ces causes de destruction ; il suffit donc qu'ils puissent supporter leur relevage, c'est-à-dire résister à une traction un peu supérieure au poids d'une longueur de câble égale à la hauteur de la mer. Le revêtement en fer des câbles doit par suite varier avec la profondeur des eaux dans lesquelles on se propose de les immerger : dans les grands fonds, cette armature doit être relativement légère ; dans les petits fonds elle doit, au contraire, être très forte pour lui permettre de résister aux causes qui ont été énumérées plus haut et quelquefois obliger même les câbles à s'enfoncer par leur propre poids dans la vase ou le sable, où ils se conservent parfaitement, à moins qu'ils n'y rencontrent quelque agent chimique attaquant le fer.

L'armature en fer des câbles de *mer profonde* est généralement formée de fils de 2 à 3 millimètres de diamètre, enroulés en hélice à long pas et jointifs, de manière à donner extérieurement au câble l'apparence d'un cordage en fer. Les fils de fer se trouvant arc-boutés les uns contre les autres, forment une gaine qui ne peut diminuer de diamètre et résiste, comme ferait un tube solide, à l'écrasement aussi bien qu'aux tractions longitudinales. L'âme ne supporte donc aucune pression nuisible et on s'en assure facilement en dépouillant de son armature métallique un bout de câble qui a été retiré de grandes profondeurs : on constate que ni l'âme, ni l'enveloppe de chanvre ne présentent aucune trace des pressions considérables auxquelles le câble y a été soumis. Le petit allongement que l'on observe dans certains cas est simplement dû à une diminution du diamètre total du câble, provenant d'un emboîtement plus complet des fils de fer les uns dans les autres. Une détorsion, même partielle, des spires produirait, il est vrai, un effet semblable ; mais l'allongement provenant de cette cause ne paraît pas atteindre, dans les câbles, un demi-mètre par mille marin [1].

Un fil de fer, recuit, de bonne qualité, soumis à une traction croissante, doit s'allonger de 18 p. 100 de sa longueur et ne se rompre que sous une charge d'environ 40 kilogrammes par millimètre carré. La densité du fer étant de 7,79, un mille de fil de fer d'un millimètre carré de section pèse dans l'air environ 14,4 kilogrammes et dans l'eau, 12,6 kilogrammes ; suspendu verticalement dans l'eau, ce fil ne doit se briser, sous son propre poids, que lorsqu'il en supporte une longueur de 40/12,6 ou 3,1 milles.

[1] Fleeming Jenkin. *Cantor lectures on submarine Telegraphy*, 1866.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En pratique, il est prudent de ne pas soumettre le fer à un effort supérieur au tiers de celui qui détermine sa rupture. La résistance à la traction d'un câble étant sensiblement égale à la somme des résistances des divers fils de fer de son armature, on voit qu'un câble armé de fer ordinaire ne doit pas être immergé par des fonds supérieurs à 1,3 mille. Aussi, substitue-t-on généralement au fer ordinaire du fer légèrement aciéré et galvanisé dit *fer homogène*. Pour les grandes profondeurs, on emploie des fils d'acier mieux trempés encore et dont la résistance à la rupture peut atteindre jusqu'à 120 kilogrammes par millimètre carré.

Le fer, même galvanisé, est attaqué par l'eau de mer, surtout lorsqu'il repose sur un terrain contenant des sulfures solubles : des fils assez gros sont alors rongés en peu de temps et effilés en aiguilles à leur extrémité ; la gutta reste intacte et maintient la communication, mais le câble se brise si on en tente le relevage. Des actions chimiques d'une autre nature viennent encore altérer le fer et donnent aux fils qui ont longtemps séjourné dans la mer un aspect fibreux caractéristique. Pour obvier à ces inconvénients, on a d'abord recouvert chaque fil de fer individuellement de chanvre goudronné et on a obtenu ainsi des câbles dont la résistance à la rupture était supérieure à la somme des résistances du métal et du chanvre considérés séparément. On a expliqué ce résultat assez inattendu en remarquant que les points faibles d'un fil de fer et ceux du chanvre qui l'entoure ne coïncident pas, en général, de telle sorte que la résistance du fil enveloppé est la somme des résistances moyennes du fil de fer et du chanvre ; tandis qu'en les soumettant isolément à une traction, chacune de ces matières casse à son point faible, et par suite ne résiste qu'à une traction inférieure à la résistance moyenne de ses diverses parties. Mais le chanvre exposé ainsi sans défense aux attaques des animaux sous-marins est bientôt rongé, au moins par places, et se décompose en outre au contact du fer rouillé. Les fils de l'armature n'étant plus jointifs, les insectes destructeurs de la gutta arrivent facilement jusqu'à l'âme, et le câble, dépourvu de toute consistance, ne peut plus être relevé. On a songé aussi à protéger les fils de fer de l'armature à l'aide soit de gomme laque, soit de glu marine[1], soit de caoutchouc, ou même de gutta-percha. Dans le câble atlantique de 1880, chaque fil de fer est entouré d'un mélange de gutta-percha et de composition Chatterton et le tout est recouvert d'un ruban imprégné de stéarine.

L'armature des câbles de grands fonds ne doit jamais comprendre moins de 9 fils de fer, pour que le câble soit suffisamment flexible, ni plus de 18, pour que le diamètre de ces fils ne devienne pas trop faible ; 12 à 15 fils de

[1] La glu marine est un mélange de 1 partie de caoutchouc, dissous ou ramolli dans l'huile de naphte minérale, et de 2 parties de gomme laque.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2 millimètres environ de diamètre donnent généralement un câble bien conditionné.

Pour les câbles intermédiaires ou d'atterrissement, on emploie, suivant les cas, du fer homogène ou du fer de qualité extra-supérieure, dit *best-best*. Ce fer doit être parfaitement recuit, très doux, et pouvoir se replier, après avoir été galvanisé, plusieurs fois sur lui-même avant de se rompre.

L'armature des câbles d'atterrissement est composée de gros fils de fer qui peuvent avoir jusqu'à 1 centimètre de diamètre, ou, ce qui donne des câbles beaucoup plus flexibles, de torons formés de trois fils de 5 à 6 millimètres de diamètre chacun, cordés ensemble.

Souvent aussi on forme le câble d'atterrissement d'une ligne sous-marine, en recouvrant une longueur convenable de câble de mer profonde ou intermédiaire d'une seconde gaine de fils de fer : les deux armatures sont séparées l'une de l'autre par une couche de chanvre.

Les fils de fer ou d'acier destinés à constituer l'armature métallique des câbles sous-marins sont soumis à des essais mécaniques de traction et de torsion, à l'aide desquels on s'assure que ces fils possèdent une ductilité suffisante pour pouvoir se plier facilement et s'allonger sans se rompre jusqu'à une certaine limite, dans le cas où ils auraient à supporter accidentellement une forte traction.

ESSAIS A LA TRACTION DES FILS DE FER

Le fil à essayer (fig. 65) est enroulé sur deux poulies **A** et **B** comprises entre deux montants et placées à 1 mètre de distance l'une de l'autre : il est fixé sur les gorges de ces poulies à l'aide de deux pièces à écrou *a* et *b*. L'axe de la poulie A porte, dans une direction perpendiculaire à sa longueur, un double bras de levier C D terminé à l'une de ses extrémités par un couteau D auquel on accroche un plateau P destiné à recevoir des poids. Le couteau D se trouve à une distance de l'axe de rotation telle que l'action des poids est décuplée. Un crochet E placé à une distance moitié moindre porte également un plateau que l'on charge de poids dont l'action n'est conséquemment multipliée que par 5. Le bras de levier C D passe entre deux autres montants qui font partie du bâti de l'appareil et qui limitent sa course entre les points F et G ; un repère indique sa position d'équilibre. L'axe de la poulie B est porté par un patin en forme de fer à cheval mobile le long des deux premiers montants : on le fait glisser dans les deux sens, à l'aide d'une manivelle H agissant, par l'intermédaire d'engrenages (fig. 66), sur une tige I K (fig. 67), dont l'extrémité filetée pénètre dans la base du fer à cheval. Le patin porte en outre une tige en cuivre qui est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

guidée dans son mouvement vertical par l'anneau L : un index M mobile le long d'une règle O N, graduée en centimètres et fixée au bâti, glisse à frottement doux sur la tige.

Pour faire une épreuve, on tourne la manivelle H jusqu'à ce que le fil à essayer soit légèrement tendu : on ramène l'index M en regard du zéro de

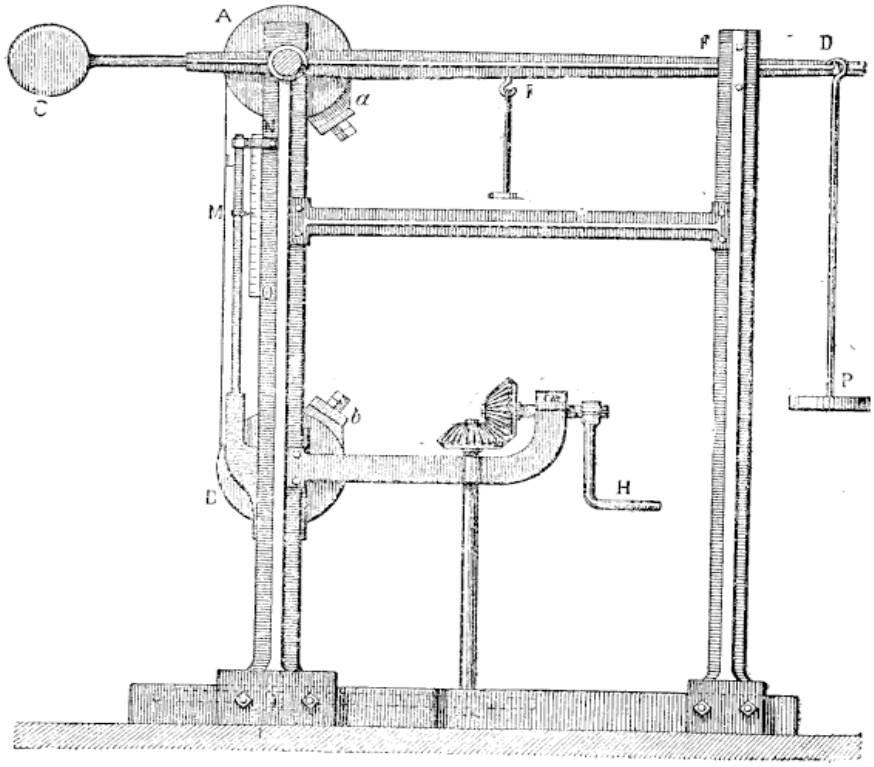


Fig. 65.

l'échelle O N et l'on ajoute successivement des poids sur les plateaux, en ayant soin de peser constamment sur la manivelle, de manière à maintenir le levier C D en regard du repère qui marque sa position d'équilibre. Si P et p représentent les poids placés sur les deux plateaux au moment où se produit la rupture du fil, la charge limite que celui-ci peut porter est $10\,P + 5\,p$.

L'allongement pour 100 du fil est représenté directement par le nombre de centimètres marqués par le curseur M au moment de la rupture.

Cet appareil a l'inconvénient de ne pas permettre une application graduelle et progressive de la force qui doit déterminer la rupture du fil de fer : sir W. Thomson en a imaginé un qui ne peut donner lieu à la même objection. Un disque en bois A B C (fig. 68) de 2,5 millimètres d'épaisseur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et de 90 centimètres de diamètre environ est solidement fixé à deux règles horizontales D E et F G. Un second disque en bois I, semblable au premier, est supporté par trois barres métalliques K H, K J et K L ; une bande de

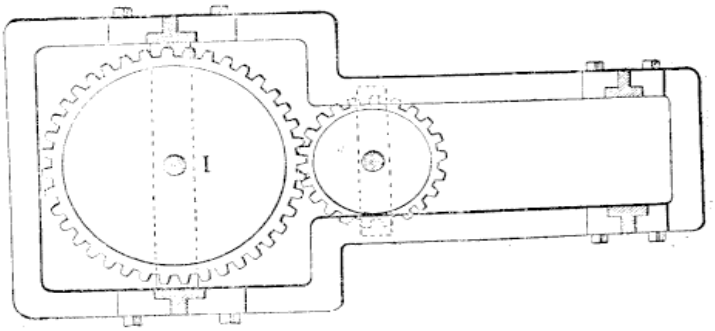


Fig. 66.

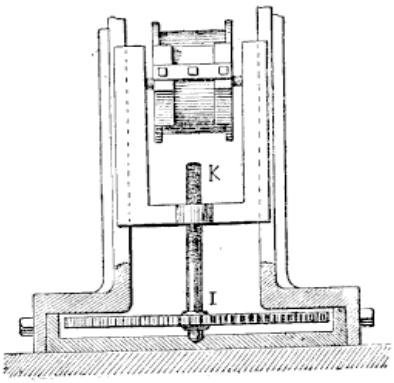


Fig. 67.

caoutchouc sépare les deux disques A B C et I. Un tube de verre M N, ouvert à ses deux extrémités, traverse le disque A B C auquel il est solidement attaché, et porte un petit renflement à sa partie inférieure. Le fil à essayer R Q est placé entre deux pinces dont l'une Q est reliée au point de jonction K des trois barres K H, K J et KL, et l'autre R à une vis munie d'une manivelle P et tournant dans un écrou qui traverse le bâti de l'appareil. L'intervalle des deux disques étant rempli d'eau, si l'on tourne la manivelle P, de façon à élever le point K, l'eau sera comprimée entre les deux disques et montera par suite dans le tube en verre. Le produit de la hauteur de l'eau dans le tube, au moment de la rupture, par la surface du disque I, donnera la mesure de la traction qui a déterminé la rupture du fil R Q. Le disque inférieur I tombe sur un support placé sous l'appareil, de manière à éviter l'étirement de la bande de caoutchouc.

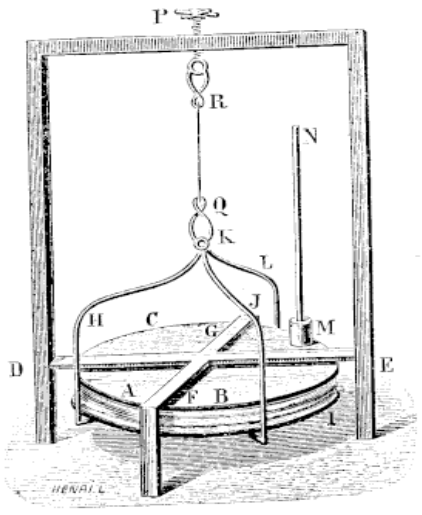


Fig. 68.

Le renflement que présente à sa partie inférieure le tube en verre est destiné à recevoir l'eau qui s'échappe de l'intervalle compris entre les deux disques, dans les premiers instants qui suivent le commencement d'une épreuve. De cette manière, l'eau ne peut s'élever dans le tube et la pression ne commence à s'exercer sur le fil que lorsque le disque inférieur I a

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déjà été soulevé d'une quantité appréciable et qu'aucun de ses points ne peut, conséquemment, plus être soutenu par le support.

Pour mesurer l'allongement du fil R Q, on attache à l'une de ses extrémités une petite échelle le long de laquelle se déplace un index fixé à l'autre extrémité. Cette méthode est plus précise que celle qui consiste à mesurer, avant et après l'allongement, la distance des deux pinces qui portent le fil, celui-ci pouvant glisser dans les mâchoires.

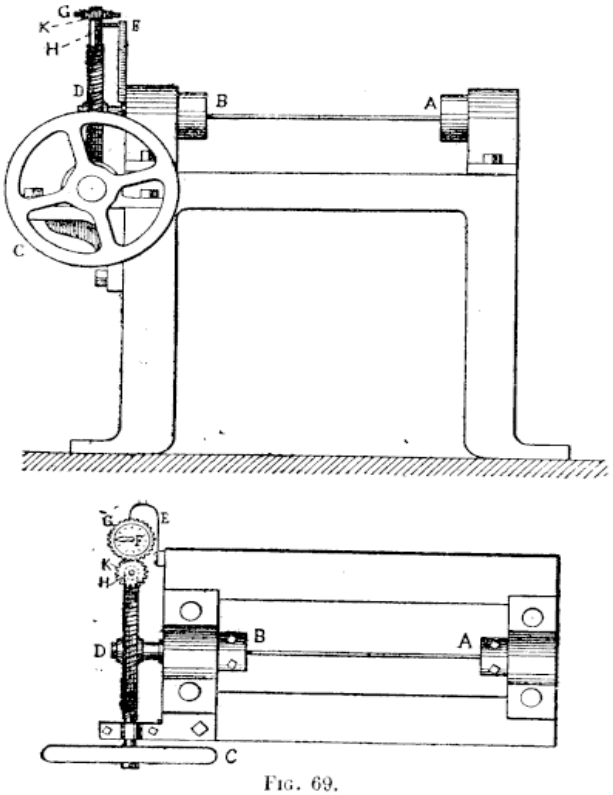


Fig. 69.

La longueur du fil soumis à l'essai est de 25 centimètres : c'est à ce point de vue seul que l'appareil de sir W. Thomson laisse à désirer. Les couronnes de fil ne peuvent, en effet, être fabriquées avec une homogénéité parfaite ; on obtient par suite des résultats variables, en opérant sur de très petites longueurs de fil qui, prises en divers points d'une même couronne, peuvent être de qualités différentes. Les essais, pour être parfaitement concluants, ne devraient pas porter sur des pièces de moins de 100 mètres de longueur. On n'obtient d'ailleurs de résultats comparables qu'en soumettant toujours *pendant le même temps* les fils à la traction. On a remarqué, en effet, que l'allongement qu'ils prennent avant de casser, varie en raison inverse du temps pendant lequel l'essai a duré ; la chaleur développée par un allongement rapide recuit sans doute un peu le fer et lui permet de s'allonger plus aisément.

ESSAIS A LA TORSION DES FILS DE FER

Le fil à essayer est saisi entre deux pièces A, B (fig. 69) semblables à celles qui, dans un tour, fixent l'objet à travailler. Elles se composent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 70) de deux mâchoires mobiles dans des coulisses et commandées par des écrous ; ces mâchoires, lorsqu'elles sont réunies, présentent une section carrée, afin d'empêcher tout mouvement de rotation du fil qui se trouve ainsi solidement étreint. La pièce A est fixe, la pièce B est mobile autour de son axe qui porte une roue dentée D engrenant avec une vis sans fin terminée par un volant C que l'on manœuvre à la main.

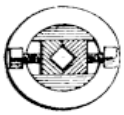


FIG. 70.

Le compteur est formé d'un ressort E fixé au massif de l'appareil et portant :

1° Une aiguille F horizontale et de position invariable ;

2° Un disque G dont les dents sont numérotées et engrènent avec un second disque K.

Ce dernier est monté sur le même axe qu'une seconde vis sans fin H qui engrène, comme la première, avec la roue D.

Le fil étant en place, on écarte un moment le ressort E de sa position normale pour ramener la dent zéro de la roue G en regard de l'aiguille F. On agit alors sur le volant C jusqu'à ce que le fil se rompe. Le nombre des dents des roues d'engrenage étant tel que pour un tour complet de la roue D le disque G tourne de l'intervalle angulaire compris entre n de ses dents, on voit qu'il suffit de lire le numéro N de la dent qui se trouve en regard de l'index F, au moment de la rupture du fil, pour connaître le nombre N/n de tours de torsion que celui-ci a subis. Quelquefois on se borne à tracer, avec un pinceau imbibé de couleur, une ligne droite sur le fil de fer entre deux points de repère, avant le commencement de l'essai, et on compte ensuite le nombre de tours faits par cette ligne. La longueur du fil sur lequel on opère est ordinairement de 25 centimètres.

La chaleur développée dans un fil de fer par la torsion est bien moins considérable que celle due à une traction, les fibres extérieures du cylindre se trouvant seules déplacées violemment dans le premier cas. Aussi les résultats des essais à la torsion dépendent, dans une bien moindre proportion que précédemment, du temps durant lequel ils ont lieu.

Les meilleures qualités de fer au bois supportent mieux les essais à la torsion que ceux à la traction. Ainsi trois fils de fer de 15 centimètres de long et de 5 millimètres de diamètre environ ont donné les résultats suivants :

	Allongement pour 100.	Nombre de tours de torsion.
Fil de fer ordinaire.	17,4	12
Fil de fer au bois.	17,0	18
Fil de fer homogène.	17,6	13

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le déplacement des fibres d'un fil de fer soumis à une torsion augmentant proportionnellement à la distance de ces fibres à l'axe, les nombres des tours de torsion que des fils de même qualité peuvent suppporter doivent être sensiblement en raison inverse des diamètres des fils.

Un autre essai qui donne une mesure très précise de la ductilité d'un fil, consiste à compter le nombre de fois qu'on peut le plier et le replier à angle droit sur un cylindre de même diamètre. Malheureusement, l'essai ne porte que sur une longueur de fil extrêmement courte, et sa qualité peut être très différente à des distances même très rapprochées de la partie que l'on expérimente.

Au point de vue de la galvanisation, on exige ordinairement que le fil puisse supporter, sans que le fer ou l'acier soit mis à nu, même partiellement, quatre immersions successives d'une minute chacune, dans une dissolution de sulfate de cuivre faite dans cinq fois son poids d'eau.

La table[1] ci-dessous indique les qualités des fils de fer qui ont été employés pour la construction de quelques câbles sous-marins.

Moyennes d'un grand nombre d'essais faits de 1878 *à* 1882, *par MM. Clark, Forde et C^ie sur des fils de fer destinés à l'armature de câbles sous-marins.*

NOMS DES FABRICANTS	NATURE DES FILS	Diamètre du fil en millimètres	Poids à la rupture en kilogr. par millimètre carré	Allongement pour 100	TORSION NOMBRE DE TOURS dans un sens	TORSION NOMBRE DE TOURS dans l'autre sens	DÉSIGNATION DES CABLES
»	fer galvanisé	5,08	51	18,3	3	0	Second câble d'Australie
Felten et Guillaume	fer homog. galv.	2,54	101	7,1	3	3	idem.
»	idem.	2,54	123	5,7	3	2 1/2	Est et sud de l'Afrique
Johnson et Neveu	idem.	2,49	130	5,1	3	2 1/2	Hongkong et Manille
Felten et Guillaume	idem.	2,51	117	5,5	3	3	idem.
idem.	idem.	2,51	90	4,9	3	3	idem.
idem.	fer galvanisé	5,08	48	18,1	3	0	idem.
Johnson et Neveu	idem.	5,03	47	19	3	0	idem.
Felten et Guillaume	fer homog. galv.	2,49	102	5,2	3	3	Atlantique, 1880
G. F. Rogers	idem.	2,54	91	3	3	3	idem.
Johnson et Neveu	idem.	2,49	129	4,9	3	3	idem.
Fox et C^ie	idem.	2,54	86	3,5	3	3	idem.
Felten et Guillaume	acier galvanisé	2,51	150	5,7	3	2	idem.
idem.	fer galvanisé	5,08	49	14,5	3	0	Placentia Sydney, 1880
Johnson et Neveu	idem.	5,00	48	18,5	3	0	idem.
idem.	idem.	4,19	46	17,8	3	0	idem.
Hill et C^ie	idem.	4,06	44	18	3	0	idem.
Felten et Guillaume	idem.	4,29	49	15,7	3	0	idem.
idem.	idem.	6,10	48	18	3	0	Placentia Sydney, 1880
idem.	idem.	5,11	47	16,5	3	1	Greetseil Valentia, 1882

[1] J. Munro and A. Jamieson's *Rules and tables*, 1885.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MACHINERIE

L'enroulement des fils de fer ou d'acier sur l'âme recouverte de chanvre se fait, en principe, à peu près de la même manière que le revêtement en chanvre de l'âme même. Le câble traverse un axe creux qui porte un plateau sur lequel se trouvent des bobines chargées de fils de fer. Ces fils rejoignent le câble à une certaine distance du plateau en formant pour ainsi dire les génératrices d'un cône assez allongé. Le câble se trouvant d'une part sollicité à s'avancer en ligne droite dans la direction de son axe, et le plateau recevant d'autre part, d'un arbre de couche, un mouvement de rotation sur lui-même, les fils s'appliquent sur le matelas de chanvre de l'âme, suivant une hélice dont le pas dépend des vitesses relatives des deux mouvements.

Si la machine fonctionnait toutefois dans des conditions aussi simples, le fil de fer de chaque bobine serait tordu de 360° à chaque rotation du plateau et par suite ne tarderait pas à se rompre. Cette torsion se produit, il est vrai, dans les machines à chanvre, mais n'y donne lieu à aucun inconvénient sérieux ; on a soin d'ailleurs, en prévision de cet effet, de tordre aussi peu que possible, lorsqu'on le file, le chanvre ou le jute destiné à cet usage. Mais des dispositions spéciales ont dû être prises pour éviter absolument toute torsion des fils dans les machines à recouvrir de fer. La solution de ce problème repose sur quelques considérations géométriques très simples.

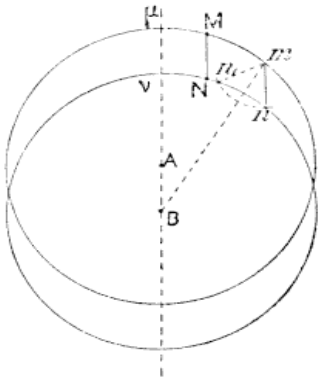


FIG. 71.

Imaginons qu'une circonférence (fig. 71) tourne autour d'un axe passant par son centre A, et qu'une seconde circonférence d'un rayon égal à celui de la première ait son centre B situé sur la verticale de A ; imaginons encore que les deux circonférences soient reliées l'une à l'autre par une série de tiges rigides, parallèles entre elles et à la ligne des centres AB. Il est aisé de reconnaître que, si la seconde circonférence ne peut prendre qu'un mouvement de rotation autour de son centre, les différentes tiges conserveront toujours leur position relative initiale. L'extrémité M de l'une quelconque MN de ces tiges venant en effet en m, par suite de la rotation de la circonférence A, la seconde extrémité N ne pourra occuper que l'une ou l'autre des deux positions n et n_1, obtenues en décrivant, du point m comme centre avec MN comme rayon, un arc de cercle prolongé jusqu'à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ses deux instersections avec la circonférence B. Or, $m\,n$ est parallèle à M N, car si l'on fait glisser la seconde circonférence parallèlement à elle-même, de manière à ce que son centre vienne en A, elle recouvrira exactement la première, et tous ses points auront décrit des chemins égaux et parallèles. En outre, $m\,n$ est la seule position que puisse prendre la tige M N, car les points n et n_1 étant symétriques par rapport à la ligne B m, il serait impossible de passer brusquement de l'une de ces positions à l'autre, à moins que la tige M N n'occupât la position $\mu\,\nu$, et qu'elle ne fût toute seule. La présence simultanée de plusieurs de ces tiges détermine donc la conservation de leur parallélisme originaire.

Câbles de grands fonds.

L'arbre creux E E (fig. 72), à l'intérieur duquel chemine l'âme recouverte de chanvre, porte trois roues A, B, C qui tournent avec lui. Sur la première de ces roues A sont montées seize tiges de manivelles m (fig. 73), toutes

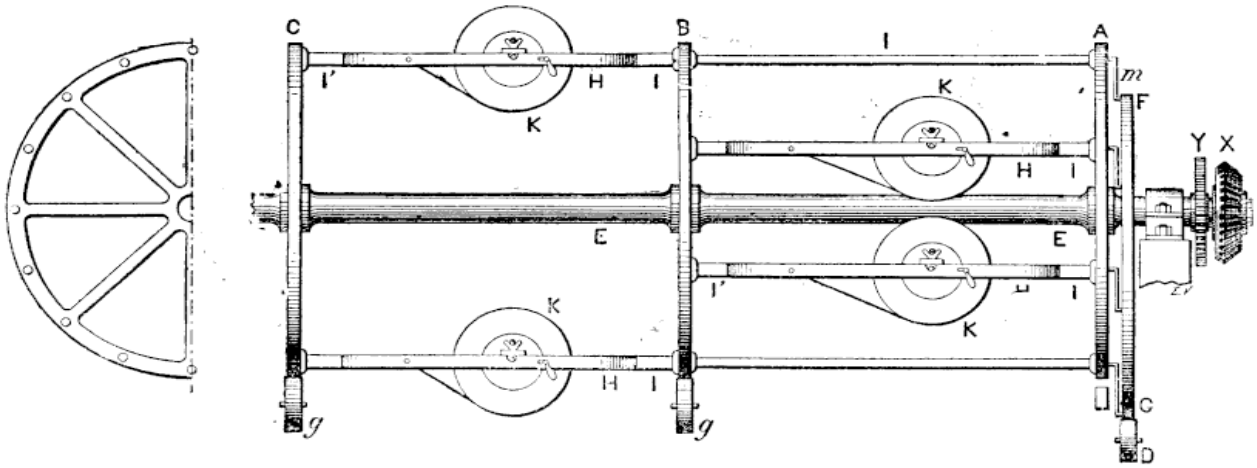


Fig. 72.

verticales et égales entre elles, qui relient la roue A à un grand anneau F G ; le centre de cet anneau se trouve sur la même verticale que celui de la roue A et est maintenu dans cette position par deux galets D sur lesquels l'anneau roule. Seize cadres rectangulaires en fer H, dont les plans sont horizontaux, sont placés moitié entre les roues A et B, moitié entre les roues B et C. Ces cadres sont soutenus, au milieu de leurs petits côtés, par des tiges également horizontales I I′ en deux pièces formant le prolongement les unes des autres. Toutes ces tiges sont fixées, par l'une de leurs extré-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mités, aux têtes des manivelles *m* (fig. 74) et traversent, dans des ouvertures ménagées à cet effet, les roues A et B ; les huit premières s'arrêtent à la roue B, les huit dernières à la roue C. Dans les cadres se placent les bobines K chargées de fils de fer ; chacune d'elles est traversée par un axe J qui repose par ses deux extrémités dans des coussinets placés sur les

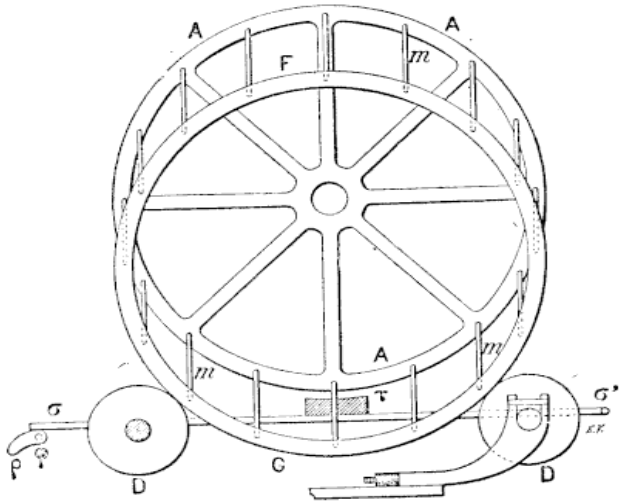


Fig. 73.

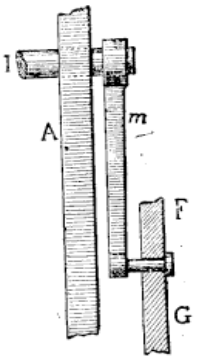


Fig. 74.

grands côtés du cadre ; les axes J sont donc horizontaux et les joues des bobines verticales. Les axes J sont maintenus en place par une pièce en fer M (fig. 75), fixée au cadre par deux boulons ou par une charnière et un boulon.

Lorsqu'une couronne de fil est épuisée, on lève la pièce M, on retire la

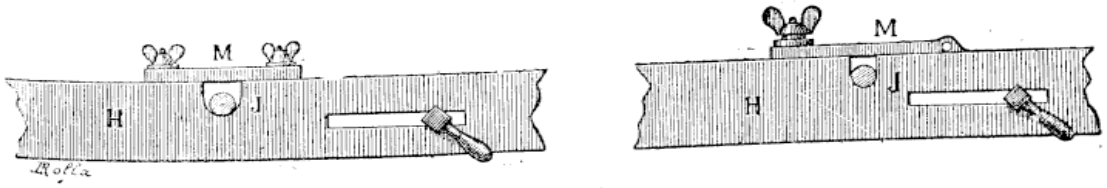


Fig. 75.

bobine vide et on la remplace par une bobine pleine, à l'aide d'une grue ; les bouts des fils des bobines sont soudés à une forge volante établie sous la machine. Cette opération nécessite chaque fois l'arrêt de toute la machinerie. Un petit frein *d* (fig. 76) monté sur les bobines permet de laisser le fil se dérouler avec la tension voulue. Les fils de fer, après avoir quitté les bobines,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont guidés sur de petites poulies n, passent à l'intérieur des tiges I' qui sont creuses et arrivent à l'appareil de torsion.

Pour éviter de trop charger l'axe creux E E, les deux roues B et C roulent

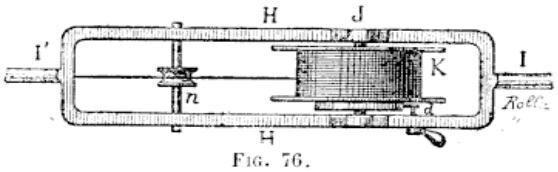


Fig. 76.

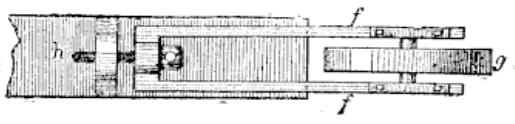


Fig. 77.

chacune sur une paire de galets g. Les roues et les galets s'usant très rapidement par suite de leur frottement réciproque et devant toujours être maintenus en contact, les axes des galets, au lieu d'être fixes, sont portés

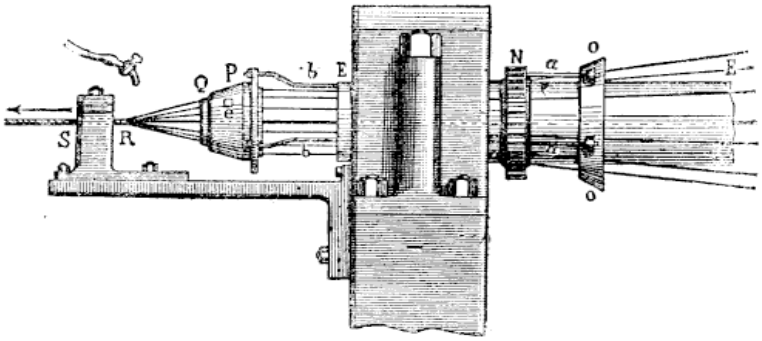


Fig. 78.

par une fourchette f (fig. 77) que l'on peut avancer ou reculer à l'aide d'une vis h tournant dans un écrou fixé au bâti de la machine. L'usure du premier galet, que les roues rencontrent à partir de leur point le plus bas, est généralement beaucoup plus rapide que celle de l'autre.

La torsion des fils de fer autour de l'âme se fait à l'extrémité opposée de la machine. Le bout de l'arbre creux E E (fig. 78) est soutenu par un palier L en avant duquel l'arbre porte une roue dentée N percée de trous destinés à livrer passage aux fils de fer : trois tiges a fixées à cette roue soutiennent un anneau o (fig. 79) à l'intérieur duquel glissent les fils. A leur sortie de la roue N, ceux-ci se logent dans les rainures longitudinales qui sont pratiquées dans la masse de l'arbre creux E E, à la traversée du palier L. Une pièce tronc-conique creuse P (fig. 80), fixée à l'extrémité de l'arbre creux E par trois tiges b, renferme, engagée à frottement très dur et maintenue en place par un boulon c, une autre pièce tronc-conique pleine Q (fig. 81) portant à sa surface des rainures héli-

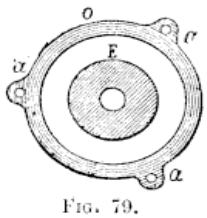


Fig. 79.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

coïdales. Les fils de fer, préparés par ces rainures à prendre la forme définitive qu'ils auront sur le câble, se réunissent un peu plus loin autour

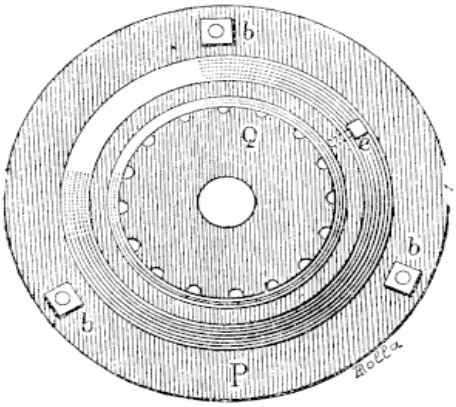


Fig. 80.

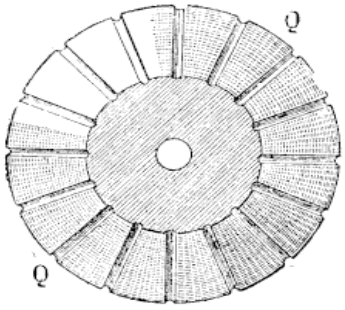


Fig. 81.

de l'âme en un point R où un tuyau d'eau entretient une humidité permanente.

Le toupin S dans lequel passe le câble, immédiatement en arrière du

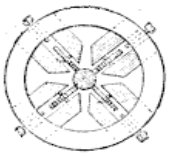


Fig. 82.

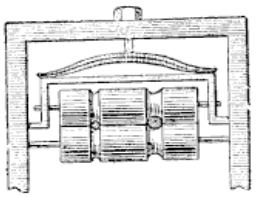


Fig. 83.

point R, est destiné à rendre les fils de fer de l'armature bien jointifs. Il est formé quelquefois, comme celui des machines à chanvre, d'un collier en fer d'un diamètre intérieur égal à celui du câble et divisé en deux parties entre lesquelles on interpose des plaques de caoutchouc et que l'on boulonne l'une sur l'autre.

D'autres fois, le toupin se compose (fig. 82) de quatre galets qui sont placés dans un même plan vertical perpendiculaire à la longueur du câble et qui roulent à sa surface ; la position des axes qui les supportent est réglée, dans chaque cas particulier, d'après le diamètre du câble. D'autres fois encore, on se sert de deux rouleaux horizontaux sur chacun desquels est creusée une gorge demi-circulaire (fig. 83) ; l'axe du rouleau supérieur est mobile dans deux rainures verticales fixes et est pressé contre le rouleau inférieur par un fort ressort.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au sortir du toupin, le câble s'enroule trois fois autour d'un grand tambour T (fig. 84) qui reçoit un mouvement de rotation de l'arbre E, ainsi que nous le verrons un peu plus bas, et qui détermine l'appel du câble à travers toute la machinerie. Une pièce en acier très dur U, à laquelle sa forme effilée a fait donner le nom de *couteau*, s'appuie sur l'un des bords du tam-

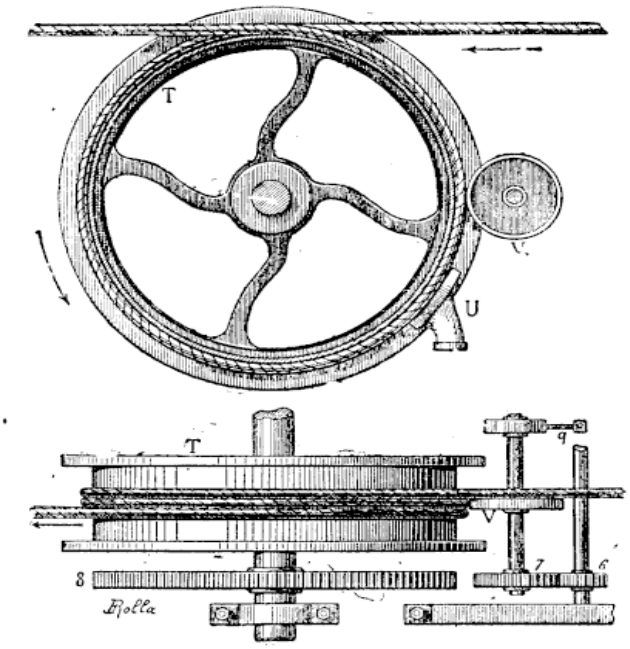


FIG. 84.

bour et en repousse constamment les tours de câble déjà enroulés, de manière à faire place au câble arrivant. Une poulie V, que la machine fait également tourner, presse en outre le second tour de câble contre le tambour, avec une force que l'on peut faire varier à volonté, en déplaçant légèrement son axe au moyen de la vis q.

La commande des diverses parties de la machine se fait à l'aide de la roue N (fig. 78) et de deux autres roues dentées X et Y montées sur l'arbre creux E E près de la roue F G (fig. 72) entre deux paliers (fig. 85). La roue d'angle X (fig. 86) engrène avec les dents du cône W dont l'axe Z, perpendiculaire à l'arbre E, porte deux poulies, l'une α calée et l'autre β folle. Une courroie sans fin, qui reçoit son mouvement d'un arbre de couche, s'enroule autour de la poulie α, passe entre deux tiges $\gamma\gamma'$ montées sur un système de deux tringles horizontales $\delta\delta'$, mobiles dans les coulisses $\lambda\lambda'$ et rendues solidaires par la pièce ε. En manœuvrant à la main, dans un sens ou dans l'autre, l'en-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

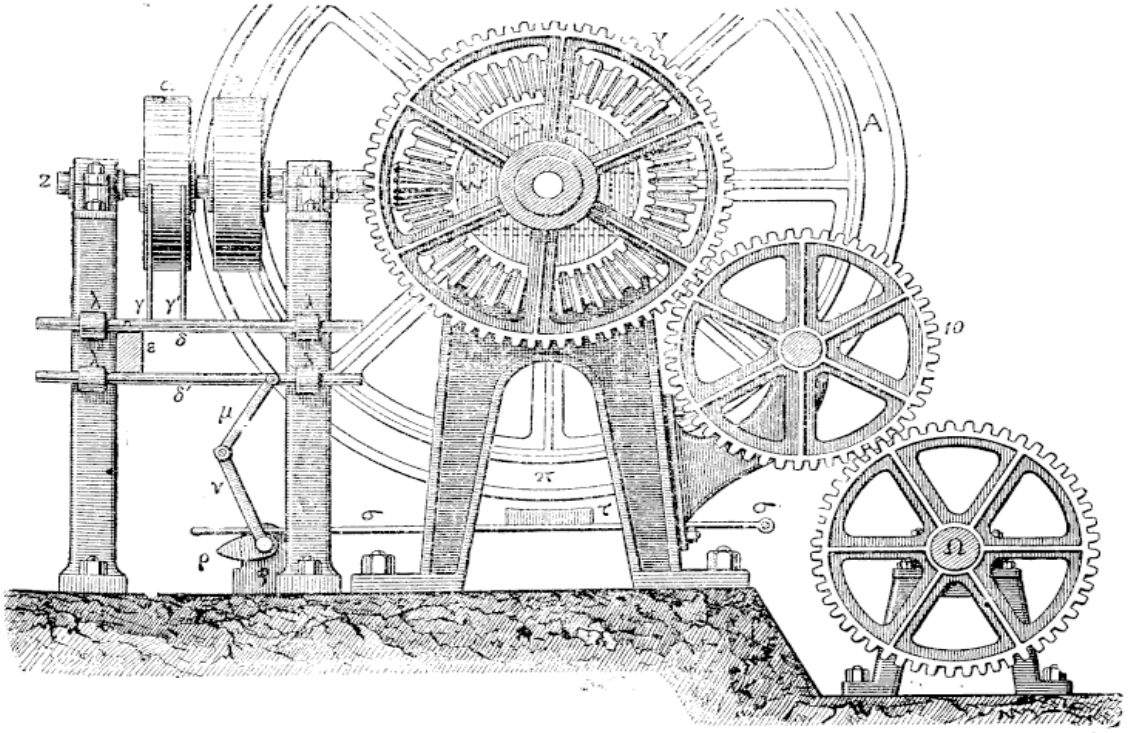


Fig. 86.

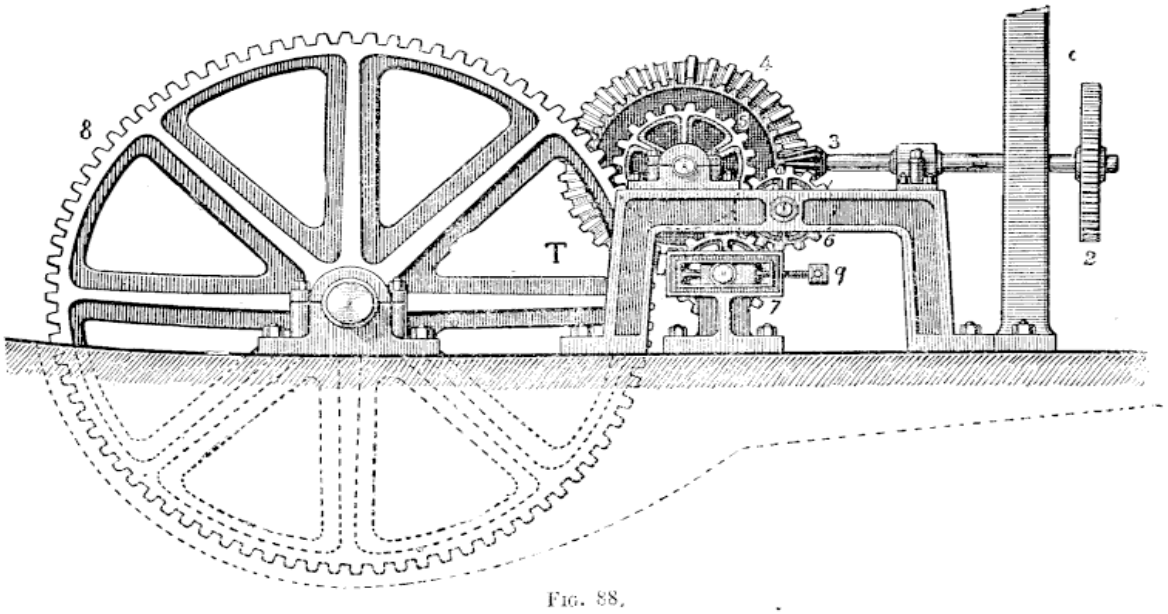


Fig. 88.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

semble de ces deux tringles, on fait passer la courroie sur la poulie folle et on arrête le mouvement de la machine, ou inversement. La tringle δ' a pour but de faire agir simultanément un frein sur la roue A, de manière à faire perdre rapidement à la machine sa vitesse acquise. A cet effet, deux leviers articulés μ et ν sont reliés à la tringle δ' et à un axe φ (fig. 73) qui porte une came ρ, laquelle soulève un levier $\sigma\sigma'$, lorsque l'arbre φ est tourné dans le sens convenable par le déplacement même des deux tringles δ et δ'. Le

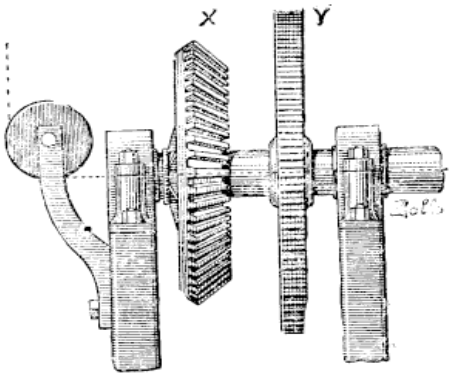


Fig. 85.

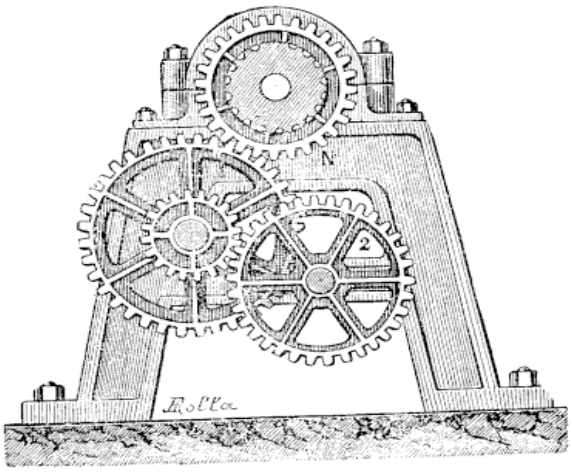


Fig. 87.

levier $\sigma\sigma'$, mobile autour d'un point fixe σ', porte un sabot en bois τ qui vient frotter contre la tranche π de la roue A, dès que l'action du moteur ne se fait plus sentir sur la machine et en détermine ainsi rapidement l'arrêt complet.

La roue dentée N (fig. 87) par l'intermédiaire d'un système d'engrenages numérotés de 1 à 5 (fig. 87 et 88) fait tourner la roue 8 montée sur le même axe que le tambour ; la roue 5 engrène en outre avec la roue 6 qui conduit la roue 7, laquelle est montée sur l'axe de la poulie V (fig. 84).

La roue Y enfin (fig. 86) actionne deux roues 10 et 11 ; l'axe ω de cette dernière règne tout le long de la machine et commande, ainsi que nous le verrons plus loin, les appareils d'enroulement des bandes de toile et ceux d'entraînement du câble qui précèdent immédiatement la cuve dans laquelle il doit être lové.

Le mouvement de progression du câble est ainsi rendu complètement solidaire de la rotation de l'axe E et par suite de celle des roues A, B et C. Cette solidarité est essentielle pour éviter, d'une part, que les fils de fer puissent s'enrouler sur l'âme sans que celle-ci avançât, d'où résulterait un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bourrelet de fer sur le câble et, d'autre part, que l'âme puisse avancer sans que la machine tournât, ce qui aurait pour effet d'appliquer les fils de fer en long sur l'âme.

Sur l'axe du tambour T est disposé, en outre, un compteur qui n'est pas figuré sur les dessins pour ne pas les compliquer, et qui est destiné à donner la longueur de câble fabriquée. Il convient de remarquer cependant que les indications de cet instrument ne sont pas très précises, le tambour tournant très souvent un peu sans entraîner le câble retenu en arrière par les fils de fer. Les nombres donnés par le compteur sont ainsi toujours trop forts.

Câbles intermédiaires.

La machine à recouvrir de fils de fer les câbles intermédiaires a beaucoup d'analogie avec celle qui sert à armer les câbles de mer profonde ; nous nous bornerons à décrire les organes qui diffèrent dans les deux systèmes.

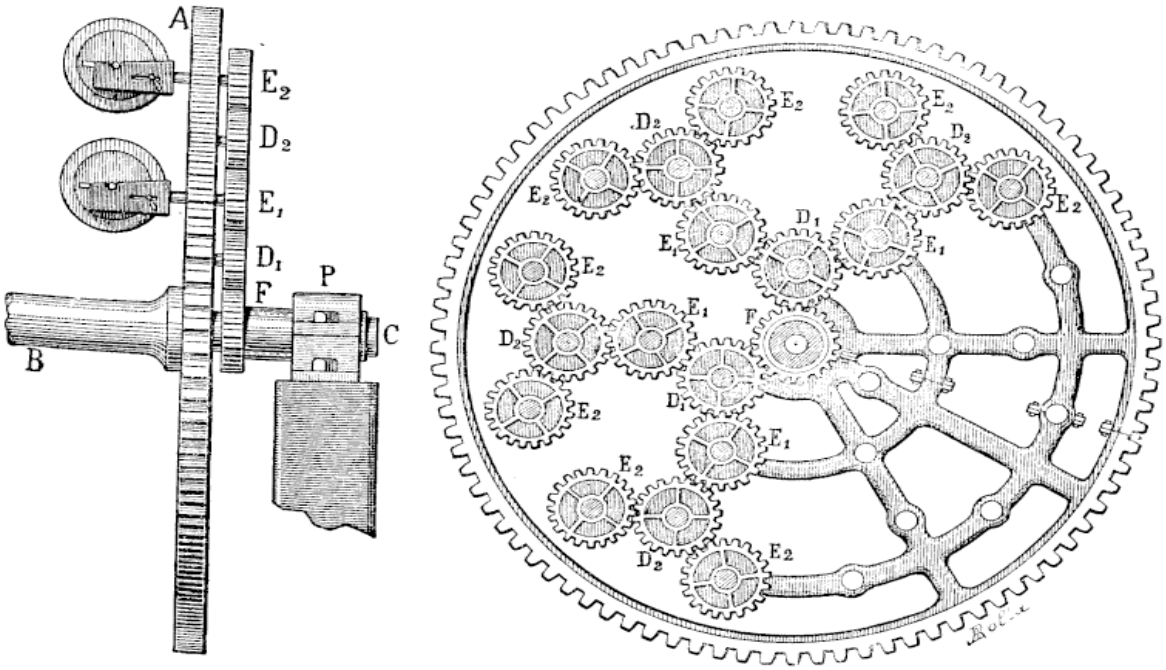


Fig. 89.

Les bobines de fils de fer sont portées par une seule roue en fonte A (fig. 89) de grandes dimensions, formée de secteurs rapprochés et boulonnés les uns contre les autres et dont l'axe creux B C donne passage à l'âme préalablement recouverte de chanvre. Cette roue présente des nervures per-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cées de trous, les unes circulaires et concentriques à la roue elle-même, les autres radiales et sur lesquelles sont vissées des plaques de tôle : sa périphérie est dentée. Sur sa face postérieure, se trouvent, en très grand nombre, de petites roues dentées, toutes de même diamètre, engrenant les unes avec les autres, et disposées régulièrement sur des circonférences concentriques D_1 D_1..., E_1 E_1..., D_2 D_2..., E_2 E_2... Ces roues sont montées sur des axes qui passent à travers les trous pratiqués dans les nervures. Sur la face opposée de la roue A, les axes des roues D_1 et D_2 portent un simple arrêt pour les maintenir en position; ceux des roues E_1 et E_2 se prolongent et se terminent par une fourchette qui reçoit l'axe des bobines chargées de fils de fer. Les roues D_1, enfin, engrènent avec une roue F ayant également le même diamètre et le même nombre de dents et qui est liée invariablement au palier P : cette roue F est conséquemment *fixe*

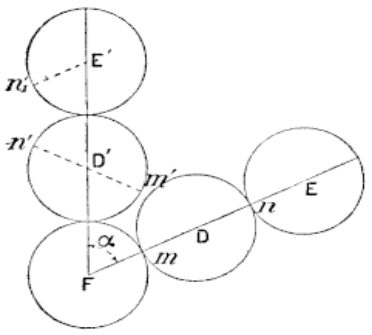


FIG. 90.

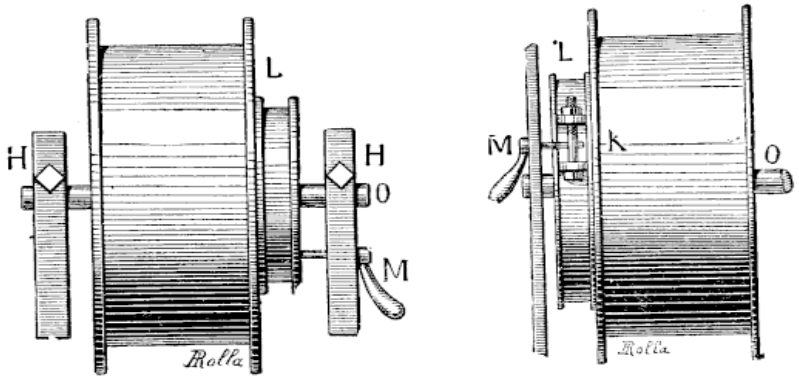


FIG. 91.

et ne participe ni au mouvement des roues D, ni à celui de l'arbre creux B C.

Il est facile de voir que les roues E_1 et E_2, emportées dans le mouvement général de rotation de la roue A, tournent toutes autour de leur centre particulier, d'un angle égal et de sens opposé à celui qu'elles décrivent dans le même temps autour de l'axe creux B C, de telle sorte que leur mouvement absolu est une translation circulaire autour de cet axe. Soient, en effet (fig. 90), à un instant quelconque, m et n, les points de contact d'une roue D avec la roue fixe F et une roue E ; nous supposons, pour la simplicité du raisonnement, que les centres des circonférences primitives

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de ces trois engrenages sont en ligne droite. Soit, en outre, α l'angle dont tourne la roue A dans un temps donné, à partir de la position considérée : les roues D et E se trouveront transportées en D′ et E′. La position m' de l'ancien point de contact m des roues D et F s'obtiendra en faisant l'angle F D′ $m' = \alpha$; le point n' situé à l'autre extrémité du diamètre m' n' représentera la position qu'occupe sur la roue D′ l'ancien point de contact n des roues D et E. Pour avoir la nouvelle position n'_1 de ce même point de contact sur la roue E', il suffit de faire l'angle F E′ $n'_1 = n'$ D′ E′ = F′ D′ m' = α = E′ F E. Il en résulte que les lignes E′ n'_1 et E n sont parallèles, et que par conséquent la roue E a simplement été transportée parallèlement à elle-même.

FIG. 92.

La proposition subsiste si les centres des trois roues considérées ne sont pas en ligne droite et si la roue intermédiaire D à un diamètre différent de

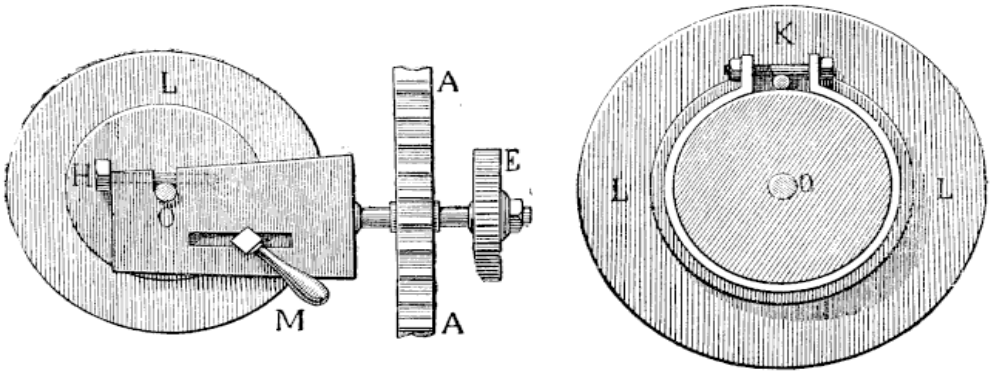


FIG. 93.

celui des roues E et F : il suffit, dans ce dernier cas, de substituer dans le raisonnement, aux angles décrits, les chemins parcourus sur les circonférences primitives des engrenages.

D'après cela, il est manifeste que si les axes des bobines de fil de fer sont, au départ, disposées horizontalement sur les fourchettes, qui portent les axes des roues E_1 et E_2, cette horizontalité se conservera pendant la rotation de la grande roue A, et les fils de fer se dérouleront sans aucune torsion, résultat que l'on s'était précisément proposé d'obtenir.

Les bobines (fig. 91) sont en tôle et traversées par un axe en acier O dont les deux extrémités reposent sur les deux branches d'une fourchette : cet axe est maintenu dans sa position par une vis H que l'on manœuvre à l'aide d'une clef J (fig. 92). L'une des joues de chaque bobine est liée à une poulie en tôle, d'un diamètre plus faible que la bobine, et sur laquelle on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

enroule une bande de cuivre L L dont les deux extrémités sont rapprochées au moyen d'une vis K : en regard de cette vis se trouve, dans la branche voisine de la fourchette, une fente longitudinale (fig. 93) à travers laquelle on engage à refus une tige munie d'une manette M. La bande de cuivre frotte alors sur la poulie et agit comme un frein pour modérer la rotation de la bobine et par suite le déroulement du fil de fer qu'elle porte : on règle la tension du fil en serrant ou desserrant la vis K.

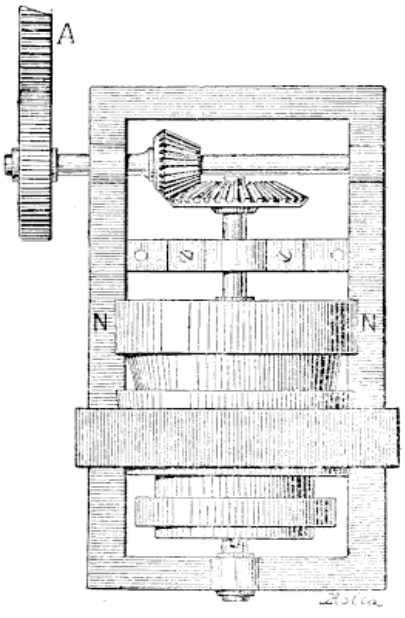


Fig. 94.

La grande roue A, dentée, comme nous l'avons vu, reçoit le mouvement, par l'intermédiaire d'une série d'engrenages, d'une poulie N (fig. 94) reliée par une courroie à l'arbre de couche. Cette poulie (fig. 95) est folle sur son arbre Q et porte latéralement une partie tronc-conique R qui peut s'emboîter à frottement dans une autre pièce tronc-conique S qu'on peut faire glisser sur une saillie M de l'arbre Q. En appuyant sur le cadre U (fig. 96), mobile autour de l'axe X, et que traversent les goujons V, on emboîte l'une dans l'autre les deux pièces R et S et l'arbre Q tourne avec la poulie N; en faisant le mouvement inverse, la poulie redevient folle, et la surface extérieure de la pièce S

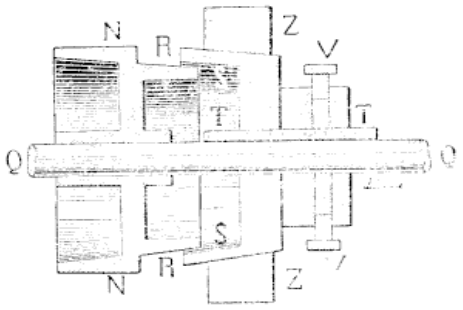


Fig. 95.

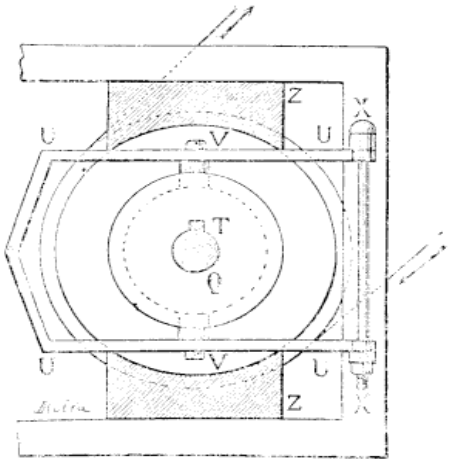


Fig. 96.

s'applique contre le frein en bois Z qui absorbe rapidement la force vive de la grande roue.

Le tambour d'appel (fig. 97) de cette machine ne diffère de celui que nous avons déjà décrit, qu'en ce que la roue à gorge a, qui presse le câble contre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le tambour, n'a pas de commande. Pour l'empêcher de se déplacer longitudinalement, une roue *b*, qui embrasse la joue du tambour W, est montée sur le même axe que la roue *a*. Les vis *c* permettent de déplacer cet axe perpendiculairement à sa longueur d'une petite quantité : on les ajuste

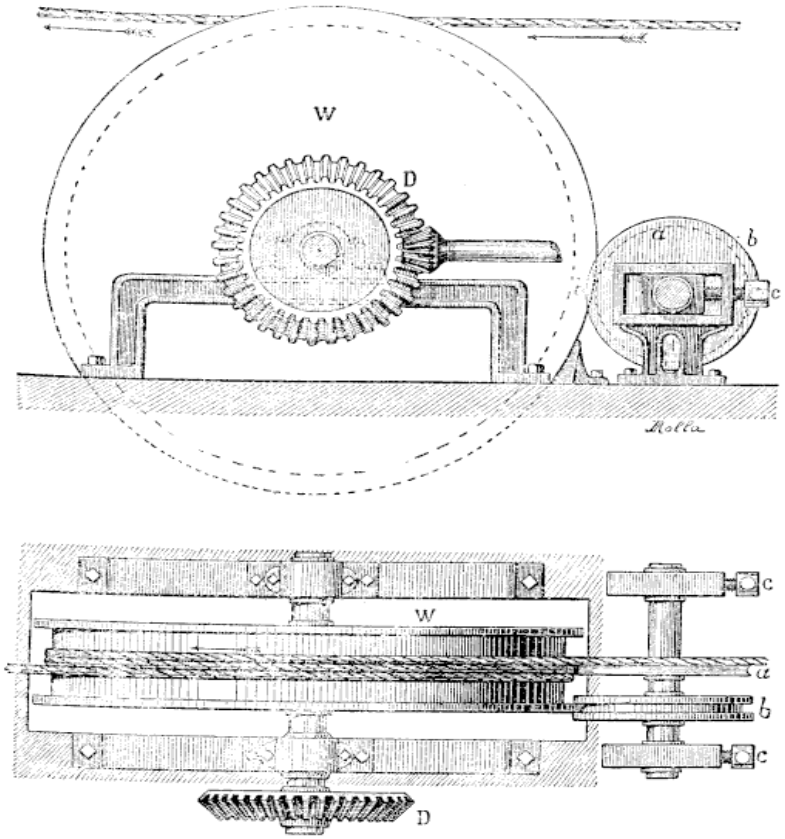


FIG. 97.

d'après la grosseur du câble que l'on fabrique. Le tambour reçoit son mouvement, par l'intermédiaire d'un système d'engrenages numéroté 1, 2 et 3 sur les figures 98 et 99 d'une roue dentée *f* montée sur l'arbre creux B C, et placée en avant de l'appareil à torsion.

Câbles d'atterrissement.

La machine à recouvrir de fils de fer les gros câbles d'atterrissement est construite d'après les mêmes principes que celle servant à armer les câbles intermédiaires, et n'en diffère que par ses dimensions, qui sont en général beaucoup plus fortes, et quelques détails que nous indiquerons succinctement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'embrayage et le débrayage de l'arbre moteur se font à l'aide d'un double manchon tronc-conique G H (fig. 100), à emboîtement analogue à celui de la machine de câble intermédiaire et monté sur un arbre O_1 O_2 parallèle à l'arbre moteur. Cet arbre est composé de deux pièces O_1 et O_2, situées dans le prolongement l'une de l'autre ; la partie femelle H du manchon est calée sur l'arbre O_2, la partie mâle G peut glisser longitudinalement sur une saillie K de l'arbre O_1.

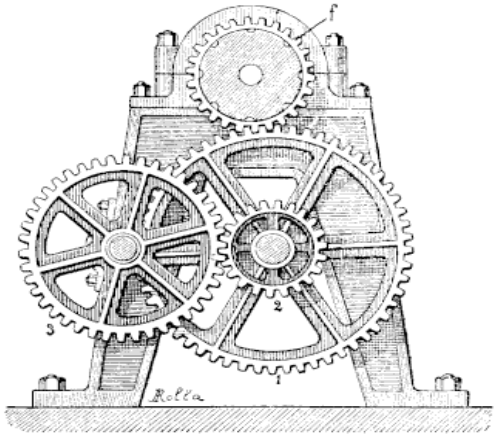


Fig. 98.

Le frein destiné à arrêter rapidement la machine est supprimé, la masse des organes que l'arbre moteur met en mouvement suffisant à absorber rapidement sa force vive, lorsque la communication avec l'arbre de couche est interrompue.

Le câble d'atterrissement ne pouvant, par suite de la raideur de ses fils de fer, supporter sans inconvénient l'enroulement sur une circonférence de petit diamètre, passe, en formant une sorte d'S renversé, sur deux tambours

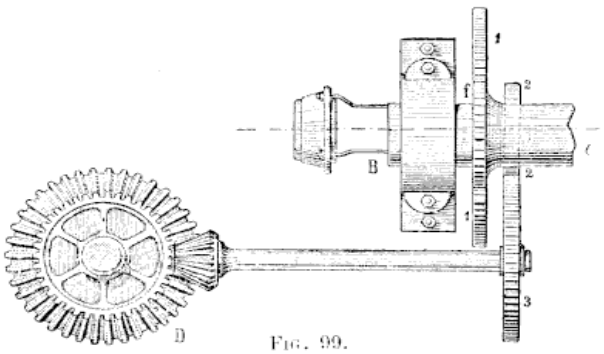


Fig. 99.

à double gorge A A (fig. 101), placés l'un à la suite de l'autre et mus en sens contraire par deux roues dentées B B engrenant ensemble et dont la première commande la seconde. La figure 102 montre les détails de la transmission du mouvement de l'arbre O_2 aux deux tambours. L'une des roues B engrène en outre avec un pignon qui, par l'engrenage conique C, donne la commande aux appareils à couvrir de jute le câble armé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 3. — ENVELOPPES DE TOILE ET COMPOSITION BITUMINEUSE

En 1858, MM. Clark, Braithwaite et Preece appliquèrent sur l'armature en fer d'un câble destiné à relier l'île de Man à l'Angleterre une couverture d'asphalte et de chanvre, dans le but de retarder la destruction par l'eau de mer de la galvanisation des fils. Ils firent passer le câble à travers une bassine animée d'un mouvement de rotation et contenant à la fois les bobines de fils de chanvre et de l'asphalte maintenu à l'état liquide par un feu de charbon de bois placé sous le récipient. L'isolement du câble fut gravement endommagé par ce procédé dont l'idée fut reprise et perfectionnée par sir Ch. Bright, en 1862. La nouvelle composition était un mélange de 65 parties, en poids, de poix minérale, 36 de silice en poudre et 5 de goudron : la silice avait été ajoutée en vue de briser le dard des toredos qui chercheraient à se faire jour à travers l'enveloppe extérieure pour arriver jusqu'à l'âme du câble.

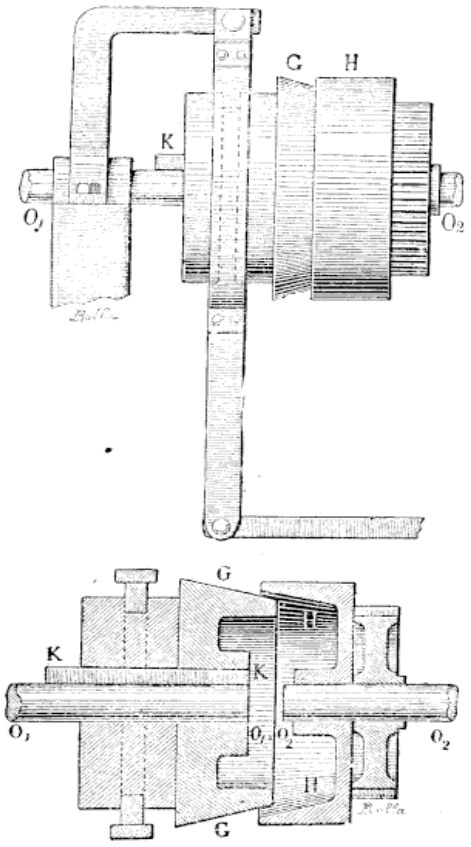


FIG. 100.

Au lieu de faire passer le câble dans la composition liquide, sir Ch. Bright imagina de verser celle-ci sur le câble par petites fractions, en suspendant automatiquement l'opération à chaque arrêt de la machine à recouvrir de fer ; de cette manière, la température à laquelle le câble se trouvait soumis ne pouvait jamais atteindre un degré préjudiciable à l'âme. Le câble passait ensuite entre une paire de rouleaux compresseurs qui forçaient une partie de la composition à pénétrer dans les intervalles des fils de fer, dont elle remplissait tous les interstices et égalisaient la surface extérieure du câble. Toute cette série d'opérations était rendue solidaire du recouvrement de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chanvre et de fils de fer, de manière à éviter les retards, les dépenses et surtout les inconvénients graves résultant de plusieurs lovages successifs.

Le procédé de sir Ch. Bright a été appliqué à tous les câbles qui ont été

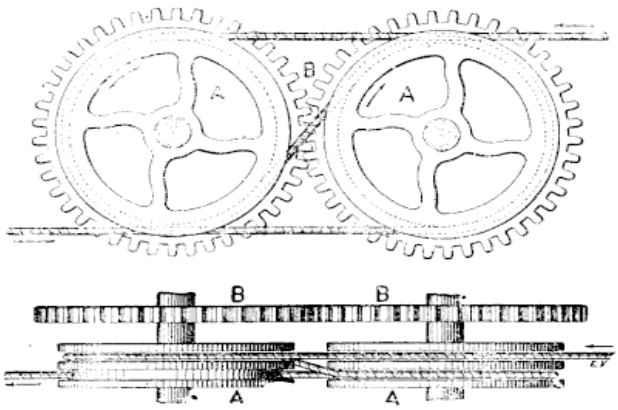


Fig. 101.

fabriqués depuis son invention. MM. Johnson et Philipps se sont bornés à remplacer, en 1872, les fils de chanvre par une double enveloppe de toile

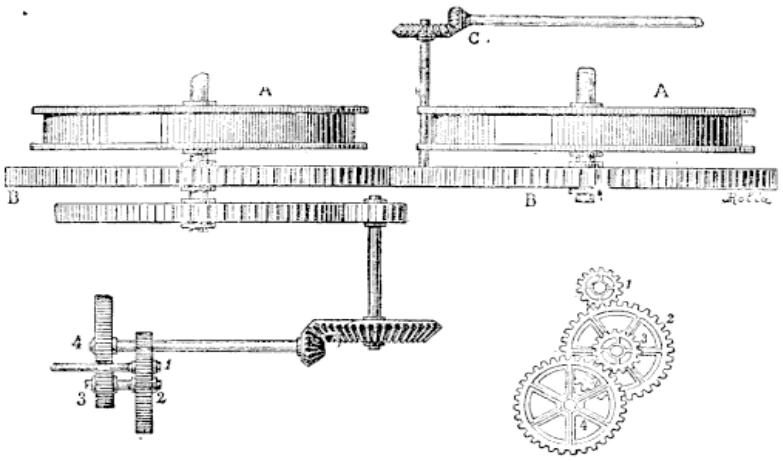


Fig. 102.

préalablement goudronnée ; la toile est plus résistante que des fils isolés, maintient mieux en place les fils de fer qui viennent à se casser pendant la pose, et enfin offre plus de difficultés au passage des animaux sous-marins qui cherchent à attaquer le jute ou la gutta.

On supprime, quelquefois, complètement le goudron dans cette composi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion : les câbles de la *Western and Brazilian Company* sont recouverts d'une mixture de 60 parties de poix minérale et de 40 parties de silice.

A *Silvertown* et dans les usines de la *Telegraph Construction and Maintenance Company*, le câble en sortant des tambours est recouvert d'abord d'une couche de composition bitumineuse froide et légèrement sirupeuse à la température ordinaire. Cette mixture est contenue dans une caisse en fer A (fig. 103) dans laquelle plonge une chaîne en fer sans fin, à gros anneaux, qui s'enroule autour de deux poulies B et C. L'excès de mixture entraînée par la chaîne tombe de la poulie B sur le plan incliné D qui le dirige sur le câble : une filière E (fig. 104) étend et régularise la couche de mixture, en force une partie à pénétrer dans les intervalles des fils de fer, et fait retomber l'excédent non employé dans la caisse A.

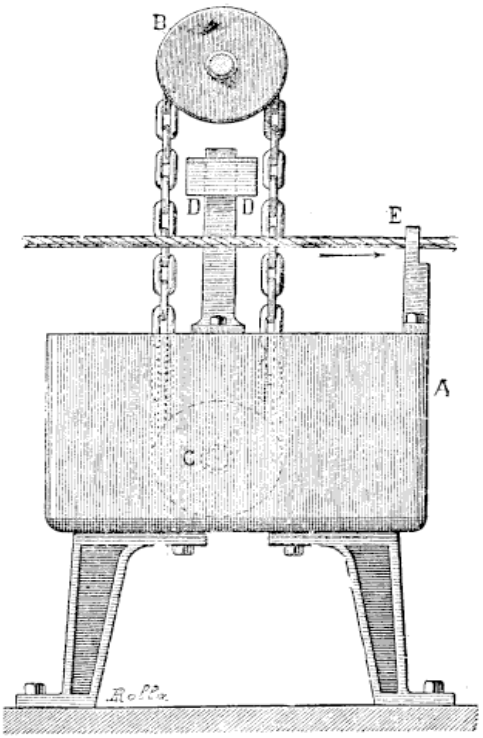


Fig. 103.

Le câble est recouvert ensuite d'une première bande de toile goudronnée enroulée en hélice. A cet effet, il pénètre dans un arbre creux A B C (fig. 105) soutenu par deux paliers P et percé à son autre extrémité d'une fenêtre longitudinale *m* de 15 à 20 centimètres de longueur, sur 2 ou 3 centimètres de largeur ; l'arbre est mis en mouvement par une courroie qui s'enroule sur la poulie S accouplée quelquefois avec deux autres poulies S′ et S″, pour le cas où l'on aurait besoin de faire varier la vitesse de rotation de l'arbre creux. A cet arbre est fixé en C un collier muni de deux bras, dont l'un D porte un contrepoids E et l'autre F la bobine G sur laquelle est enroulée la bande de toile goudronnée. La bobine est fixée par une vis à écrou mobile H, sur une pièce coudée I F, articulée en F et maintenue dans une position déterminée par la vis à écrou I ; on serre cette vis sur la tige à coulisse K qui est elle-même boulonnée sur le bras C F.

La bande de toile L passe par la fenêtre *m*, et, en tournant avec tout le système mobile autour de l'axe A B, s'enroule sur le câble en même temps que celui-ci continue sa marche générale en avant ; il en résulte que la bande prend sur le câble une forme hélicoïdale. On obtient une tension con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

venable de la bande L en agissant sur un petit frein fixé à la bobine G. Pour faire varier le pas de l'hélice, on change l'angle F.

Le goudronnage de la toile s'obtient en faisant passer une large pièce de

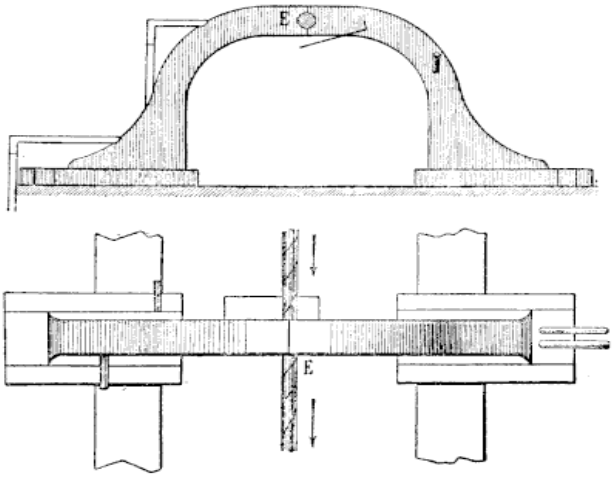


Fig. 104.

toile entre deux cylindres A et B disposés en forme de laminoir (fig. 106) ; le goudron, contenu dans une auge D à double enveloppe, est élevé par un troisième cylindre C parallèle aux deux premiers et en contact avec B.

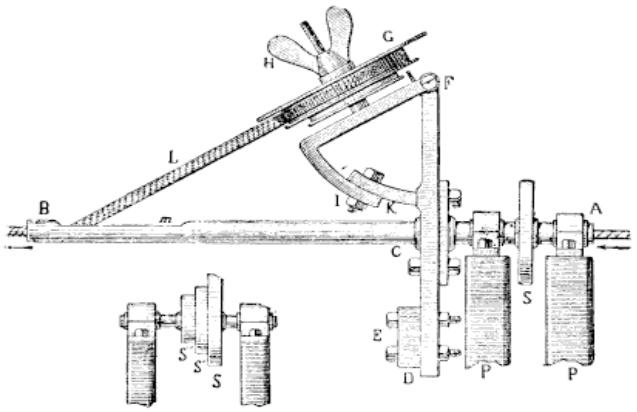


Fig. 105.

L'intérieur des deux cylindres A et B et celui de la double enveloppe de l'auge D sont chauffés à l'aide d'un courant de vapeur, afin d'éviter la solidification du goudron. Celui-ci est étendu et pressé à travers les fibres de la toile, à son passage entre les deux cylindres laminoirs ; l'excédent est recueilli et reversé dans l'auge contenant le goudron. La pièce de toile

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

refroidie est enroulée sur elle-même et débitée, à l'aide d'une scie circulaire, en tranches de la largeur voulue.

Par-dessus la toile goudronnée, on applique, à chaud, une seconde couche

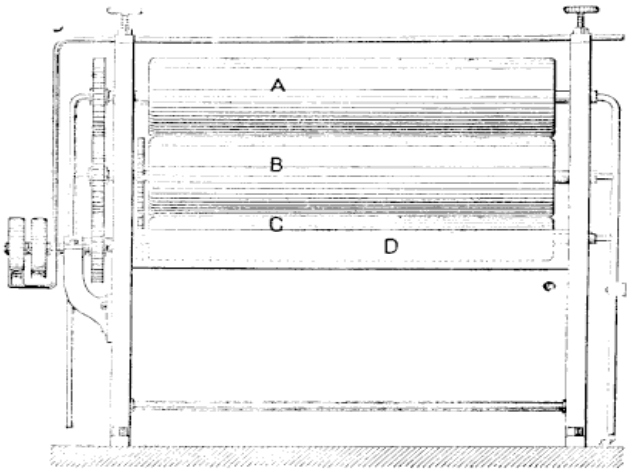


Fig. 106.

de la composition bitumineuse de MM. Clark et Bright. La mixture est renfermée dans une cuve A (fig. 107) dont le fond est chauffé par la vapeur

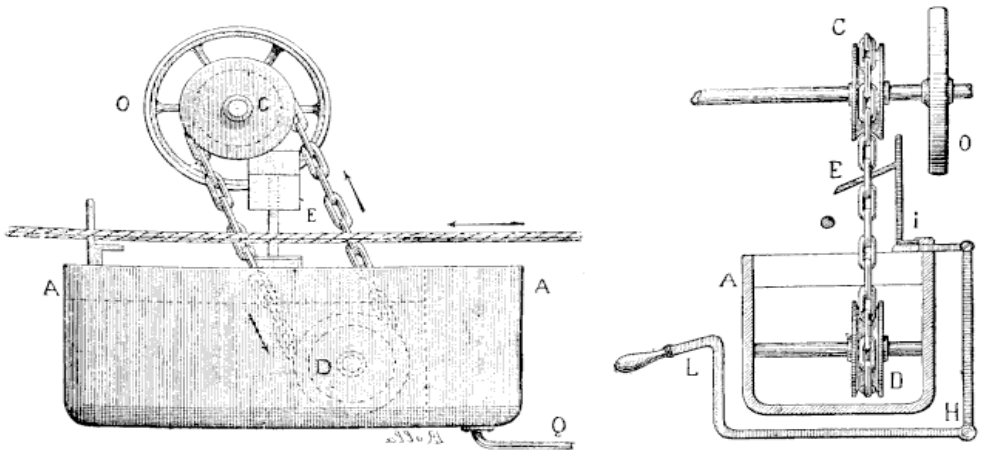


Fig. 107.

qu'amène un tuyau Q. La matière fluide est élevée par une chaîne sans fin qui s'enroule sur deux poulies C et D : la majeure partie en tombe de la poulie C sur le plan incliné E et de là sur le câble. Un ouvrier saisit celui-ci plus loin entre les deux branches d'une pince P (fig. 108), qui forme filière de manière à régulariser la couche bitumineuse appliquée sur le câble : une sorte de cuiller adaptée à la pince reçoit l'excès de matière qui est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

reversée dans la cuve A. Lorsque, pour un motif quelconque, la machine à recouvrir de fer est arrêtée, l'ouvrier agit sur le levier coudé L, mobile autour du point H, et fait glisser dans une rainure I le support du plan incliné E : la matière ne coule ainsi plus sur le câble, bien qu'elle soit toujours entraînée par la chaîne dont la rotation n'est pas interrompue. Cette

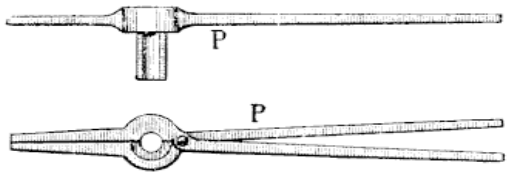


Fig. 108.

précaution est nécessaire pour que, par suite de son refroidissement, la mixture ne forme pas sur la poulie C et sur les anneaux de la chaîne exposés à l'air, des blocs solides qu'il serait difficile d'en séparer au moment de chaque nouvelle mise en marche.

Le câble est recouvert ensuite d'une seconde bande de toile goudronnée

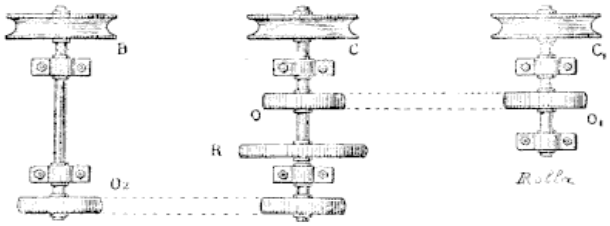


Fig. 109.

enroulée en sens inverse de la première, et enduit d'une troisième couche de composition bitumineuse, chaude comme la précédente. Afin d'obtenir une rotation continue des chaînes qui élèvent la mixture dans les diverses caisses, les roues O, O_1, O_2 (fig. 109), qui commandent les poulies supérieures C, C_1, B sur lesquelles passent les chaînes, reçoivent toutes leur mouvement d'une roue R reliée directement par une courroie à l'arbre de couche.

De l'eau froide qui s'échappe d'un long tuyau percé de petits trous est versée immédiatement après, par petits filets, sur le câble, ainsi qu'on le voit sur le dessin général d'assemblage (fig. 110), dans le but d'empêcher la chaleur de la composition bitumineuse de pénétrer jusqu'à l'âme ; cette eau retombe dans une auge placée en dessous.

Pour déterminer l'avancement du câble à partir du tambour sur lequel il s'enroule en sortant de l'appareil à torsion, on le fait passer au fond d'une rainure B creusée dans une roue A (fig. 111) ; une poulie jockey C s'engage dans la rainure et pèse sur le câble. Ces deux poulies recevant des roues

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

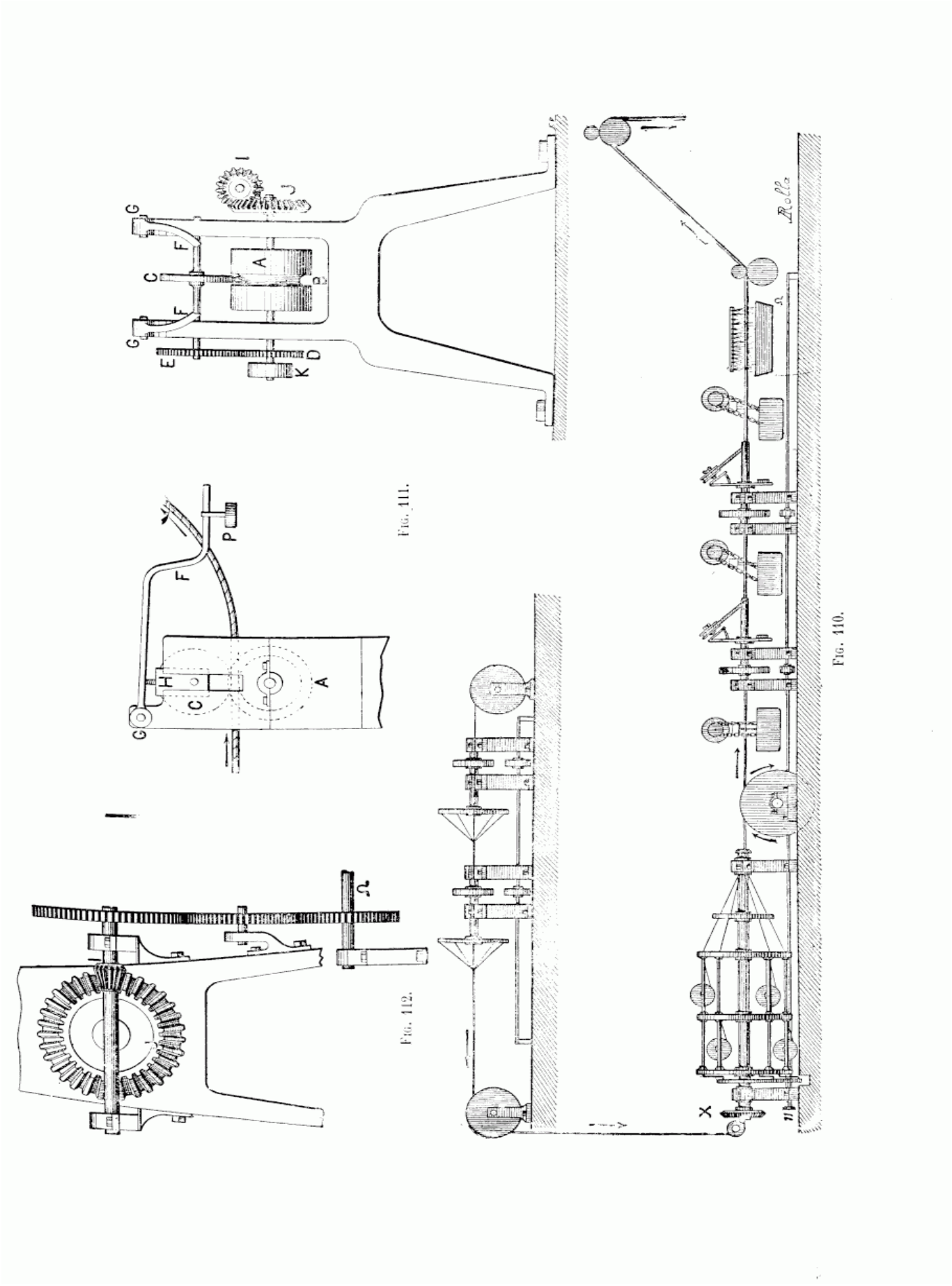


Fig. 110.

Fig. 111.

Fig. 112.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'engrenage D et E des mouvements inverses l'un de l'autre, le câble se trouve saisi comme dans un laminoir et forcé d'avancer. Afin d'obtenir toujours une adhérence suffisante entre la poulie jockey et le câble, malgré les variations de diamètre de celui-ci dans diverses fabrications, l'axe de la poulie

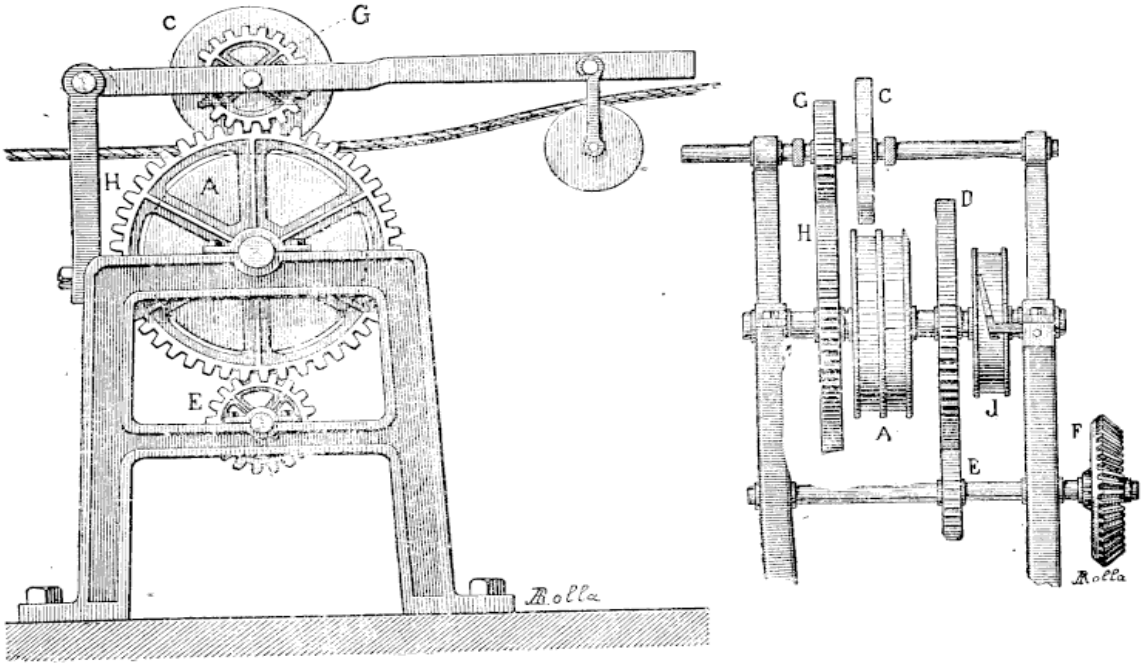


Fig. 113.

jockey C peut se déplacer dans une coulisse verticale. Un levier coudé F, mobile autour d'un axe horizontal G et portant un contrepoids P, presse en H sur l'axe de la poulie jockey et détermine l'entraînement du câble serré entre les deux poulies. On règle la pression exercée sur le câble par la poulie jockey, en déplaçant le contrepoids P le long du levier et le modifiant au besoin. La roue D qui entraîne E reçoit d'ailleurs le mouvement, par l'intermédiaire d'engrenages I et J, de l'arbre que nous avons désigné précédemment par la lettre ω (fig. 86 et 112).

Le câble se dirige ensuite vers l'axe d'une cuve dans laquelle il est lové à la main par des ouvriers : chaque couche est badigeonnée avec un lait de chaux, pour empêcher les différents tours de se coller les uns aux autres. Son mouvement en avant est déterminé par un appareil analogue à celui qui vient d'être décrit et qui est situé au-dessus même de la cuve : il est mû par une courroie qui passe sur la roue K (fig. 111).

L'appel des câbles intermédiaires et d'atterrissement se fait à l'aide d'ap-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pareils tout à fait semblables aux précédents qui concernent plus spécialement les câbles de mer profonde : la construction de tous les organes en est seulement plus robuste. La roue d'appel A (fig. 113) est conduite par les roues D, E, F et la poulie jockey G par les roues G et H ; sur la poulie J s'enroule deux ou trois fois une corde qui fait tourner l'appareil d'appel situé au-dessus de la cuve de lovage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE IV

CABLES DIVERS. — ESSAIS

§ 1er. Cables a plusieurs conducteurs.
§ 2. Essais de la résistance des cables a la traction.
§ 3. Cables légers : câbles Baudoin, Allan, Siemens, Duncan, Rowett, flottants, Bloudot et Bourdin, Trott et Hamilton. — Conclusions.

§ 1er. — CABLES A PLUSIEURS CONDUCTEURS

Les câbles à plusieurs conducteurs ne sont employés que pour les traversées de rivières ou de bras de mer de peu de profondeur. Dans tous les autres cas, il est préférable d'immerger autant de câbles séparés, à un conducteur, qu'on veut avoir de fils ; on obtient des câbles plus maniables, plus faciles à immerger et à réparer, et, en cas de rupture accidentelle de l'un d'eux, les communications sont maintenues par les autres lignes. Les câbles à plusieurs conducteurs sont en général fortement armés afin qu'ils puissent résister à l'action destructive que l'agitation des eaux exerce sur eux, surtout lorsqu'ils reposent sur un fond rocailleux. Pour obtenir des câbles suffisamment flexibles, tout en ayant la résistance mécanique nécessaire, on les recouvre souvent de deux armatures en fer, l'armature extérieure pouvant elle-même être composée de torons de plusieurs fils. Le câble immergé en 1877 (fig. 114), à l'embouchure de la Seine, entre le Hoc et Pennedepie, dans des parages où des bancs entiers de sable sont déplacés dans les grandes marées, et où, par suite, des câbles de faibles dimensions ne pouvaient résister, est un excellent type de ce genre de câbles [1]. Il dure depuis

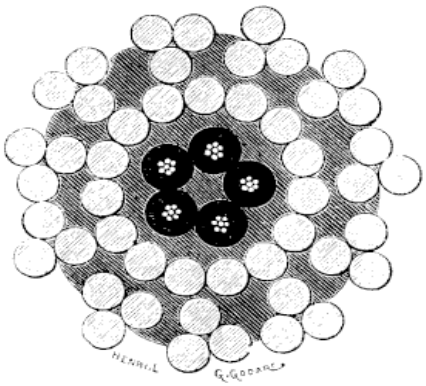


Fig. 114.

[1] Ce câble a été construit dans les ateliers de M. H. Menier, à Paris-Grenelle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

onze ans, sans avoir eu besoin jusqu'à présent d'aucune réparation ; on peut supposer qu'étant très pesant, il s'est enfoncé dans le sable assez profondément pour se trouver au-dessous des couches que la mer soulève périodiquement. Il se compose de cinq âmes cordées ensemble, revêtues d'une enveloppe de jute tanné, sur laquelle sont enroulés en hélice 15 fils de 3 mil-

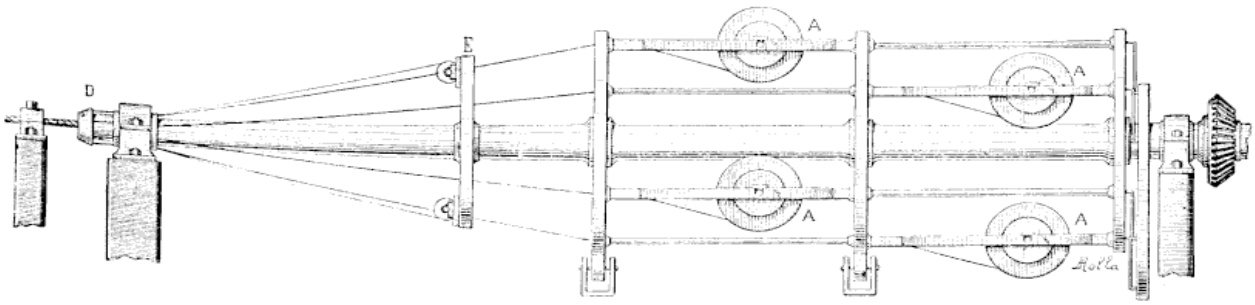


Fig. 115.

limètres de diamètre. Sur cette première armature se trouve une seconde couche de jute tanné, qui est recouverte d'une deuxième armature formée de 11 torons jointifs de 3 fils de fer de 3 millimètres chacun.

La fabrication des câbles à plusieurs conducteurs se fait à l'aide de machines tout à fait semblables à celles que nous avons déjà décrites. Les âmes destinées à être cordées ensemble sont enroulées sur des bobines et transportées dans une machine analogue à celles servant à former l'enveloppe en fer, de manière à ne donner aucune torsion aux fils pendant l'enroulement. Si l'une des âmes doit former un noyau central autour duquel les autres doivent s'enrouler, la bobine correspondante est disposée en avant de la machine et cette âme passe seule à travers l'arbre creux : dans le cas contraire, on la remplace par une cordelette de chanvre d'une grosseur convenable, d'après le nombre et le diamètre des âmes qui doivent entrer dans la constitution du câble.

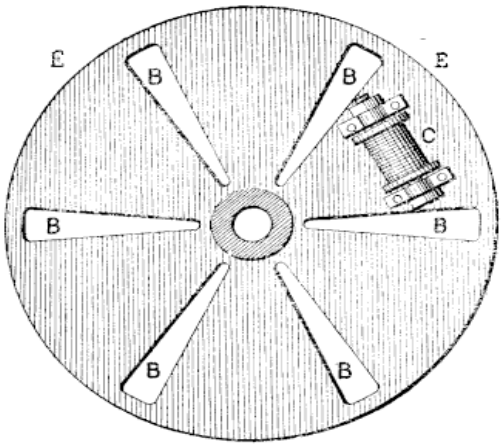


Fig. 116.

Pour bien remplir les interstices que laissent entre elles les différentes âmes, on dispose sur l'arbre creux, en avant de l'appareil de torsion (fig. 115), un plateau E sur lequel se trouvent des bobines de fil de chanvre. Les âmes venant des bobines A traversent ce plateau dans des ouvertures B (fig. 116)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pratiquées à cet effet et arrivent mêlées avec les fils de chanvre C, à l'appareil de torsion D, où le tout est cordé ensemble. L'âme multiple ainsi formée est recouverte plus loin de jute et de fils de fer, suivant la spécification demandée.

Lorsqu'une armature doit être faite de torons de plusieurs fils, ces torons sont cordés préalablement et enroulés ensuite sur les bobines de la machine à fer.

§ 2. — ESSAIS DE LA RÉSISTANCE DES CABLES A LA TRACTION

Lorsqu'un câble sous-marin est fabriqué, on mesure à la fois sa résistance à la rupture, la valeur de cette résistance pouvant seule déterminer les profondeurs auxquelles on pourra prudemment immerger le câble, et l'allongement qu'il subit avant de se rompre.

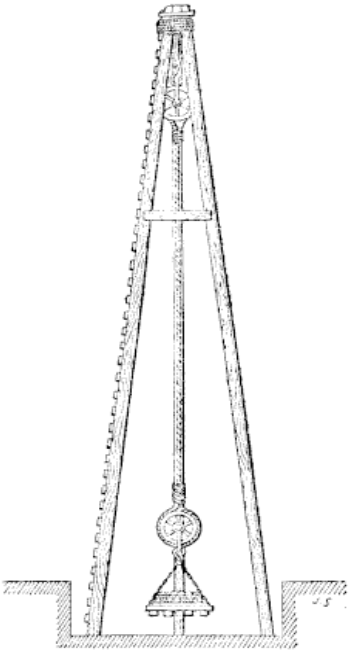


Fig. 117.

Divers appareils ont été imaginés à cet effet : le plus simple (fig. 117) consiste en un trépied d'environ 10 mètres de hauteur, à la partie supérieure duquel on peut attacher une poulie sur laquelle s'enroule l'une des extrémités du morceau de câble à essayer. Son autre extrémité passe sur une poulie semblable à l'axe de laquelle on suspend un plateau ; on augmente successivement les poids que l'on place sur ce plateau jusqu'à ce que la rupture se produise.

Cet appareil a été disposé aussi horizontalement, ainsi que l'indique la figure 118. L'allongement s'obtient en mesurant la distance qui sépare, avant la rupture, deux petits disques *a* (fig. 119), placés sur le câble, à 3 mètres d'intervalle, en face de deux traverses *c*. Ces disques portent une graduation, de telle sorte que, si l'on a eu soin de faire coïncider leurs zéros avec un fil *b*, avant l'application de la tension au câble, on mesure facilement ensuite l'angle dont ce dernier a tourné.

Un autre appareil construit par MM. Gisborne, Forde et C. W. Siemens se compose (fig. 120) d'une forte poutre A reposant sur des supports solidement fixés au sol. A l'une de ses extrémités est boulonnée une pièce de fer recourbée *a*, terminée par un crochet auquel on attache le câble à essayer;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à son autre extrémité se trouve un axe en fer *b* qui sert de point d'appui au levier coudé B. L'une des branches B de ce levier soutient un plateau chargé de poids, l'autre porte un crochet destiné à recevoir le second bout du câble. Les longueurs des deux bras du levier B sont dans le rapport de 1 à 10 : le contrepoids C fait équilibre au levier et au plateau.

Le câble traverse une gouttière D remplie d'eau afin que l'on puisse observer les effets particuliers dus à l'eau, tels que le retrait, quand l'armature comprend des cordes de chanvre ; les deux ouvertures par lesquelles passe le câble sont bouchées avec de l'étoupe, de manière à rendre la gouttière bien étanche.

L'allongement se mesure au moyen d'une échelle *e* parallèle au câble et qui traverse la gouttière, enfermée dans un tuyau. Pour que la torsion du câble ou l'allongement des chaînes et autres parties de la machine ne puisse influer sur les positions relatives de l'échelle, la pièce *d* qui maintient le câble est munie d'une petite rondelle circulaire qui pénètre dans une entaille faite à l'échelle, de façon à la faire glisser horizontalement. A l'autre extrémité du câble est fixé un cylindre *e* qui se meut en tournant, quand le câble se tord ou se détord, devant la partie de l'échelle qui porte les divisions : le cylindre est lui-même divisé comme un vernier, de manière à donner une plus grande précision aux mesures.

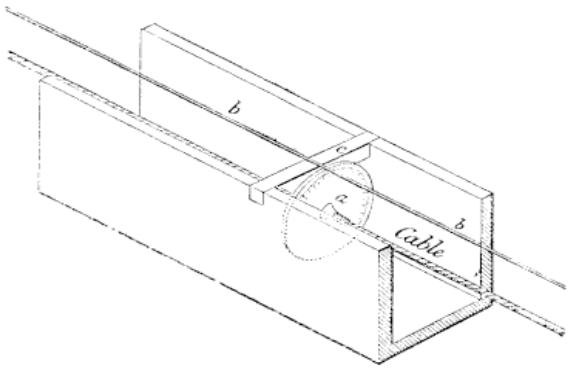


FIG. 119.

Pour faire un essai, on place d'abord sur le plateau un poids suffisant pour tendre convenablement le câble ; on ajuste le vernier et on ajoute de nouveaux poids, à des intervalles réguliers, jusqu'à ce que le câble se rompe. Un simple coup d'œil jeté sur la figure montre que le rapport des tensions supportées par les deux bras du levier reste constant et égal à un dixième, quelle que soit la position du levier : le poids placé sur le plateau et qui détermine la rupture représente donc le dixième de la charge supportée par le câble.

L'allongement se déduit de la différence des positions occupées par le cylindre *e* sur l'échelle, avant et après l'expérience.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

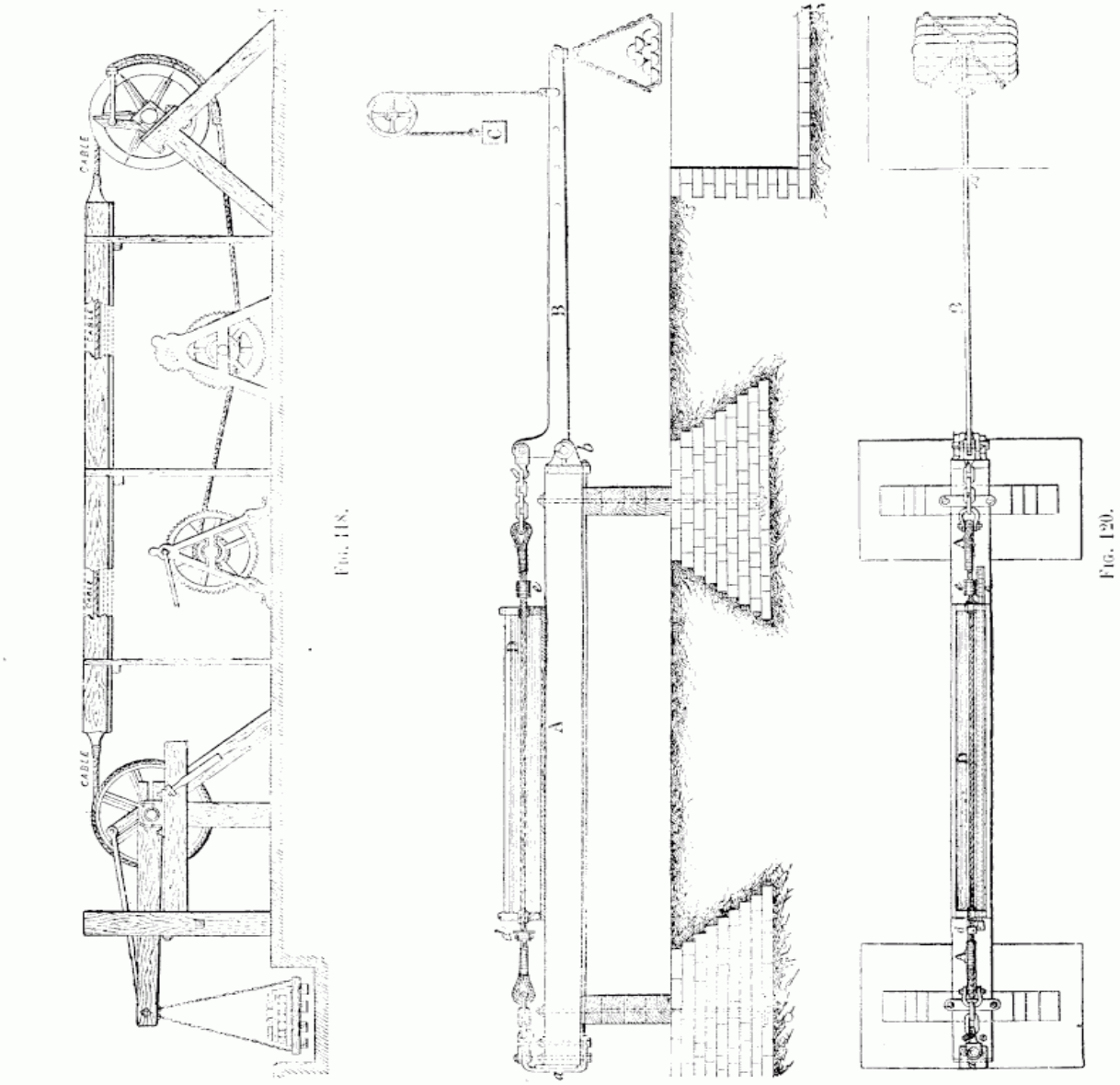


Fig. 118.

Fig. 120.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 3. — CABLES LÉGERS

De nombreux modèles de câbles ont été proposés, à toutes les époques, après l'immersion, en 1851, du câble de Douvres, pour remplacer le type créé à cette date par M. Crampton. Tous ces câbles sont caractérisés par la suppression de l'armature extérieure en fer et, pour ce motif, reçoivent la dénomination générique de *câbles légers,* par opposition aux câbles ordinaires dont le poids, par suite de la présence de cette armature en fer, est toujours beaucoup plus considérable.

Câbles Baudoin et Allan.

L'un des modèles de câbles légers les plus connus est celui imaginé à peu près simultanément par M. Baudoin, en France, et par M. J. Allan, en Angleterre, dans lequel toute la force mécanique de résistance était transportée dans l'axe même du câble ; on espérait avoir combiné ainsi le maximum de conductibilité électrique et de résistance mécanique avec le minimum de poids de volume et de densité. M. Baudoin formait l'âme de son câble d'un conducteur de six fils de fer de 2 millimètres de diamètre enroulés autour d'un noyau en chanvre bitumé. Dans le câble de M. Allan (fig. 121), le conducteur se composait d'un fil de cuivre plein, entouré de fils d'acier jointifs disposés en hélice ; sur cette cordelette on appliquait la gutta-percha, comme à l'ordinaire ; celle-ci restait à découvert ou était enveloppée, suivant les cas, soit de caoutchouc, soit de toile saturée de glu marine et d'asphalte. On devait obtenir ainsi un câble ne pesant dans l'air, par mille marin, que 450 kilogrammes et 160 kilogrammes environ dans l'eau de mer, en résistant à une traction de 2 tonnes.

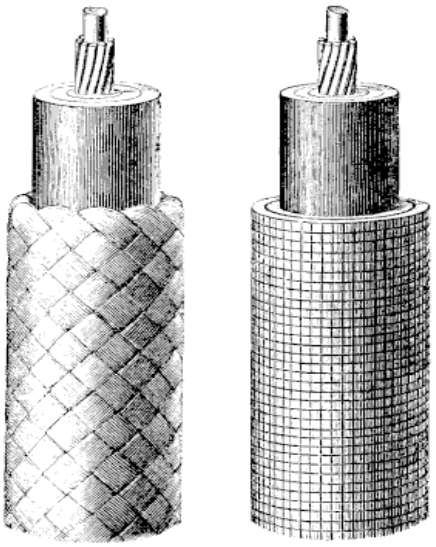


FIG. 121.

Il devait par suite supporter dans la mer le poids de plus de 12 milles de sa propre longueur. N'étant pas volumineux, un navire de dimensions moyennes eût pu en embarquer facilement 3000 milles, c'est-à-dire la longueur nécessaire pour constituer une communication entre l'Europe et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'Amérique. L'immersion en eût été faite sans machinerie spéciale et sans dangers. La vitesse de transmission des signaux enfin, comparée à celle que l'on obtient sur un câble ordinaire de même longueur, eût, d'après l'inventeur, été supérieure à celle-ci d'au moins 50 p. 100, tandis que les dépenses de fabrication et d'immersion eussent été inférieures de 20 p. 100 à celles d'un câble ordinaire. Outre les objections auxquelles donnent lieu tous les câbles légers en général, on a fait remarquer que, dans le câble de M. Allan, le contact des deux métaux différents qui composent le conducteur pouvait être susceptible de déterminer quelque action chimique fâcheuse. L'expérience seule eût pu fournir des renseignements certains à cet égard et on ne peut que regretter que ce câble, qui est ingénieusement conçu, n'ait jamais été essayé en pratique.

Câble Siemens.

Le câble que MM. Siemens frères tentèrent, sans succès, d'immerger, en 1864, entre Oran et Carthagène, et dont nous avons donné la spécification plus haut, appartient à la catégorie des câbles légers. Toute la force mécanique de résistance du câble résidait dans les deux couches de chanvre blanc qui enveloppaient l'âme, la carapace de cuivre phosphoreux n'ayant eu pour but que de maintenir le chanvre en place et de le garantir contre les attaques des animaux sous-marins. Bien qu'après plusieurs échecs successifs, ce câble ait pu être immergé dans les fonds de 1300 à 1400 brasses que l'on rencontre entre Oran et Carthagène, une nouvelle rupture se produisit en vue des côtes d'Espagne et les constructeurs renoncèrent à leur entreprise. Ce dernier accident a été attribué à l'insuffisance du mou avec lequel on laissa filer le câble à la sortie des grands fonds : le câble dut rester suspendu sur une très grande longueur et n'ayant pu supporter la traction que le poids de cette section exerçait aux points de suspension, se rompit avant même que le navire fût arrivé à Carthagène. On en doit conclure que les câbles légers, en raison de leur faible résistance à la rupture, doivent être immergés avec un mou notablement supérieur à celui des câbles ordinaires, de manière à ne se trouver soumis que le moins possible à une tension quelconque, soit en cours de pose, soit après leur immersion. L'économie que l'on compte réaliser sur les frais de fabrication disparaît ainsi déjà, au moins en partie. La vitesse de transmission des signaux diminuant d'un autre côté, à mesure que la longueur du câble augmente, le rendement commercial des câbles légers est plus faible que celui des câbles ordinaires, toutes autres choses égales d'ailleurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Câble Duncan.

Nous ne rappellerons que pour mémoire le câble de M. Duncan dans lequel l'armature en fer devait être remplacée par une enveloppe de rotin, substance fibreuse provenant d'une espèce de bambou et dont les Chinois se servent pour fabriquer des cordages destinés à retenir les jonques ou à forer des puits artésiens de plus de 1000 mètres de profondeur. Un câble recouvert seulement de rotin, dont la densité est de 1,059, pèserait 750 kilogrammes environ par mille et ne se romprait que sous une charge de 2500 à 2800 kilogrammes.

Câble Rowett.

Le capitaine Rowett avait proposé de recouvrir l'âme de cordelettes de chanvre de Manille et de Russie, enroulées en hélice et imprégnées d'une

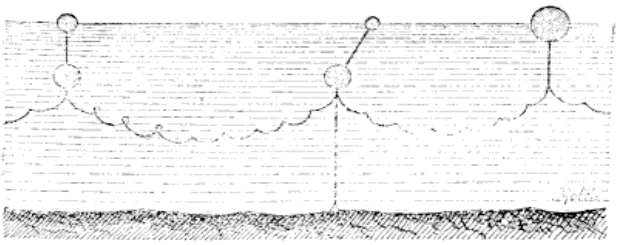


Fig. 122.

solution préservatrice spéciale. Partant de l'hypothèse que l'agitation de la mer, due à la marée et aux vents, ne s'étend pas au delà de 8 à 10 mètres de profondeur, cet officier comptait faire enfouir son câble dans une tranchée qui aurait été creusée, par des scaphandriers, jusqu'aux fonds de 10 à 12 mètres. Sans nous arrêter aux difficultés et aux dépenses qu'entraîneraient de semblables travaux, nous nous bornerons à faire remarquer que l'agitation de la mer, due aux causes que nous venons d'indiquer et abstraction faite des courants sous-marins qui paraissent exister à toutes profondeurs, est beaucoup plus considérable que ne le supposait le capitaine Rowett : d'après notre propre expérience, elle se ferait sentir, dans le bassin occidental de la Méditerranée au moins, jusqu'à 300 mètres de profondeur.

Câbles flottants.

D'autres inventeurs ont proposé, à diverses reprises, de laisser flotter entre deux eaux les câbles suspendus de distance en distance à des bouées ; ces bouées, complètement immergées, seraient amarrées au fond de la mer, et leurs positions rendues apparentes à la surface à l'aide de petites bouées-témoins (fig. 122). Les derniers promoteurs de ce genre d'entreprises pro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

posaient même de profiter de ces bouées-témoins pour y installer des feux et des postes télégraphiques qui, à l'aide de dérivations prises sur le câble, permettraient aux navires de correspondre, durant leur voyage, avec leurs ports d'attache et avec d'autres navires même, en route comme eux.

L'idée, bien que très séduisante, est malheureusement chimérique. Sans compter les difficultés considérables d'immersion et d'exploitation d'un câble semblable, les bouées, ainsi que le prouvent des expériences trop multipliées, seraient emportées par la tempête en fort peu de temps ; si elles résistaient, le câble, usé à ses points de suspension, ne tarderait pas à s'y briser, en supposant d'ailleurs qu'il ne fût pas rompu préalablement par quelque grand cétacé.

Câble Blondot et Bourdin.

MM. Blondot et Bourdin ont présenté à l'Exposition d'Electricité, à Paris, en 1881, un modèle de câble léger formé d'un conducteur plein en cuivre, de 3 millimètres de diamètre, recouvert de trois couches de gutta-percha alternant avec deux couches de caoutchouc de Para : entre la première

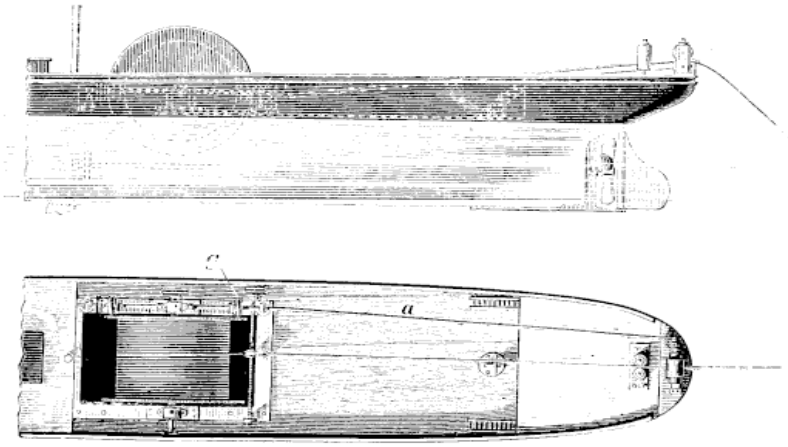


Fig. 123.

couche de gutta et le conducteur central était interposée de la composition Chatterton pour assurer l'adhérence parfaite du cuivre au diélectrique. La gutta servant à la fabrication de la couche la plus extérieure, était mélangée à chaud avec du bichlorure de mercure, en vue de détruire les animaux sous-marins qui attaqueraient la matière isolante. Le tout était recouvert d'un ruban de coton imperméabilisé très résistant. Les soudures du conducteur en cuivre étaient faites à l'argent et enfermées dans un manchon en cuivre demi-rouge : les essais avaient montré qu'elles étaient très résistantes et suffisamment flexibles pour que le fil pût être enroulé sur un cylindre à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

petit rayon. Tout le conducteur en cuivre, nécessaire à la construction d'un câble atlantique, devait être préparé ainsi, à l'avance, en une seule pièce, de manière à permettre l'emploi sans arrêt de la presse à gutta, et conséquemment l'application, sans soudure, des diverses couches de matière isolante. Les parties de câble destinées à être immergées aux atterrissements devaient être armées en fer, à la manière ordinaire.

Un modèle réduit de la machine de pose du câble de grands fonds avait été, en outre, exposé par les inventeurs. Tout le câble devait être enroulé sur une grande bobine à axe horizontal que faisait tourner (fig. 123) une petite machine indépendante de la machine motrice du navire, mais dont la marche se réglait sur celle de cette dernière; la vitesse de déroulement du câble suivait ainsi toutes les variations de celle de la marche du navire, et n'en différait que par une quantité proportionnelle, fixée à l'avance et représentant le *mou* ou perte pour cent en sus du chemin parcouru.

Un appareil à deux aiguilles concentriques, très ingénieusement combiné, indiquait, en permanence, par le déplacement relatif des deux aiguilles, celle des deux vitesses qui était en excès sur l'autre : en agissant sur la petite machine de pont, on pouvait leur rendre promptement leur valeur relative antérieure; les deux aiguilles se recouvraient alors l'une l'autre. Le câble guidé entre deux rouleaux verticaux, passait dans un laminoir recouvert de feuilles de caoutchouc et placé à l'extrémité arrière du navire. Ce laminoir recevait le mouvement d'un arbre a qui lui-même était commandé par un galet de friction g, maintenu constamment à la hauteur de la couche de câble en déroulement; la vitesse tangentielle, à la surface du laminoir, était ainsi toujours égale à celle du câble sur la bobine. On rattrapait les différences inévitables à l'aide d'un ressort placé sur la tête de l'un des cylindres et servant d'intermédiaire entre l'axe et le cylindre lui-même : celui-ci pouvait ainsi, en cas de besoin, glisser légèrement sur son axe d'entraînement, d'où résultait pour le câble une tension constante, entre la bobine et le laminoir. La vitesse de déroulement du câble étant d'ailleurs supérieure à celle de la marche du navire, le câble devait non seulement quitter le bâtiment sans tension, mais être pour ainsi dire projeté dans la mer.

Des circonstances indépendantes de leur volonté ont empêché les auteurs de ce projet de réaliser leurs conceptions; l'expérience eût assurément été intéressante à plus d'un titre.

Câble Trott et Hamilton.

En 1884, MM. Trott et Hamilton ont critiqué l'emploi des câbles armés de fer, en se basant surtout sur l'attaque de ce métal par l'acide carbonique

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dissous dans l'eau de mer, et sur le mouvement de détorsion que la forme hélicoïdale des fils de fer tend à donner aux câbles, lorsqu'ils reposent sur le fond de la mer sans aucune tension : cette détorsion qui, suivant eux, serait d'au moins 100 tours par mille marin, déterminerait la rupture du câble aux points où, par suite d'une corrosion accidentelle, l'armature en fer se trouverait déjà partiellement détruite. Ils ont proposé de leur substituer un modèle de câble léger construit de la manière suivante : l'âme formée, comme à l'ordinaire d'une cordelette de fils de cuivre et de plusieurs couches de gutta-percha, serait recouverte d'une double enveloppe de chanvre. La première de ces enveloppes (fig. 124), enroulée sur le câble de droite à gauche, par exemple, serait composée de torons cordés de gauche à droite ; la seconde enveloppe enroulée sur le câble de gauche à droite, serait composée de torons cordés de droite à gauche. Par suite de cette disposition, le retrait du chanvre de chaque couche dans l'eau aurait pour effet, suivant les inventeurs, non seulement de s'opposer à un mouvement de détorsion de l'autre couche, mais de resserrer ses propres spires et de consolider ainsi le câble entier. Les cordages en chanvre ne se détériorant pas sensiblement sous l'eau, MM. Trott et Hamilton estiment que la durée des câbles de ce modèle serait, sinon pratiquement indéfinie, du moins très supérieure à celle des câbles armés en fer.

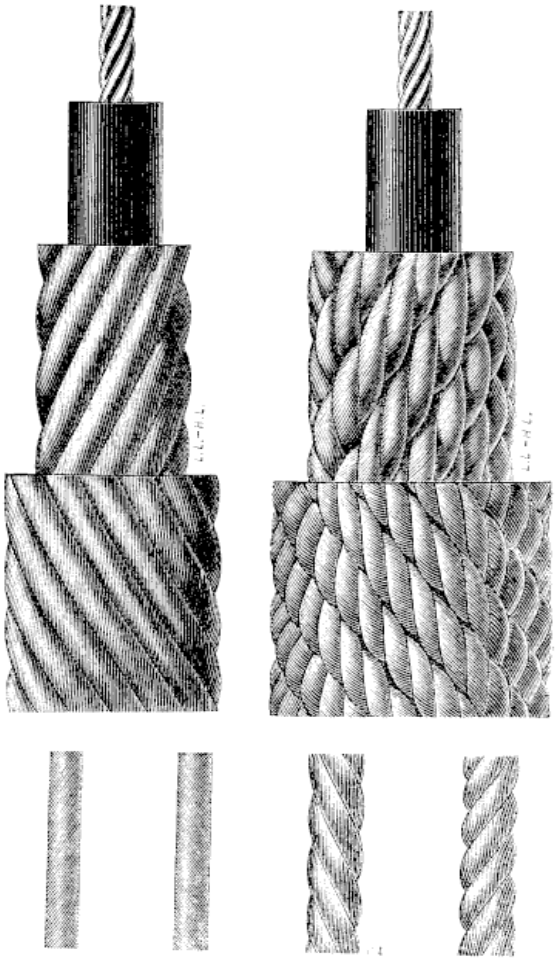


Fig. 124.

Bien que cette détorsion ait été mise en doute et s'explique assez difficilement, les bobines de fils de fer tournant parallèlement à elles-mêmes pendant l'enroulement en hélice de ces fils sur l'âme, nous devons reconnaître que nous en avons observé maintes fois les effets.

La rotation sur lui-même d'un câble en relevage, dès qu'elle commence

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à se produire, indique même avec certitude que le bout en est soulevé au-dessus du fond et flotte librement dans la mer : or, ce mouvement, dans un câble relevé verticalement, ne paraît pouvoir être attribué qu'à une force de détorsion qui réside dans son armature et qui, dès lors, y existait antérieurement à son relevage.

CONCLUSION

La substitution des câbles légers aux câbles armés, bien que défendue avec talent depuis l'origine même de la télégraphie sous-marine, n'a cependant jamais été admise par les grandes compagnies et est combattue encore aujourd'hui par les ingénieurs les plus expérimentés. M. Willoughby Smith avait aussi proposé à l'ancienne Compagnie Atlantique un modèle de câble léger, dont l'âme, composée de cuivre et de gutta-percha devait être recouverte de deux couches de chanvre enroulées en sens inverse l'une de l'autre et comprenant, la première huit torons, la seconde dix-sept. Ce câble devait peser 608 kilogrammes dans l'air et supporter une traction de 4 tonnes avant de se rompre, soit 5,3/4 milles de sa propre longueur dans l'air et 29 milles dans l'eau [1]. Mais, après six mois d'immersion dans l'eau d'un échantillon de ce câble, M. W. Smith reconnut que, par suite du retrait du chanvre, l'âme avait, en divers points, fait saillie en dehors de son enveloppe.

En outre des chances d'avarie si bien mises en évidence par l'expérience de M. Smith, le chanvre serait exposé, en bien des parages, aux attaques d'animaux qui le rongeraient avec une très grande rapidité ; en ces points au moins, malgré l'inaltérabilité du chanvre dans l'eau de mer, l'âme se trouverait mise à nu en très peu de temps. Les teredos étant rares dans les grandes profondeurs, la gutta pourrait s'y conserver intacte néanmoins ; mais alors il semblerait rationnel de supprimer l'enveloppe de chanvre partout et de réduire les câbles à leur âme, en revenant ainsi au type du câble d'expériences de Douvres à Calais.

Or on a vu qu'il avait fallu attacher des poids, de distance en distance, à ce câble, pour le forcer à descendre au fond de la mer : un câble d'un poids spécifique aussi faible mettrait assurément des jours à atteindre les fonds de 2000 à 2500 brasses, et on ne peut que soupçonner les dangers auxquels il serait exposé pendant ce temps ; mais l'exemple des premiers câbles de Donaghadee à Portpatrick, qui cependant étaient recouverts de chanvre, en témoignant de la puissance de certains courants sous-marins, permet de

[1] On donne quelquefois le nom de *module de rupture* à la longueur de câble, suspendue verticalement dans l'eau, dont le poids détermine la rupture du câble.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

penser que l'immersion des câbles légers pourrait n'être pas toujours aussi facile que le supposent leurs défenseurs.

Il est avéré, d'un autre côté, que, même dans les grandes profondeurs, soit de l'océan Atlantique, soit des autres mers, il existe, au moins par places, des inégalités brusques de terrain. L'angle d'immersion des câbles ne dépassant pas généralement 10 ou 11°, près de 30 milles de câble doivent, sur les fonds de 2000 brasses, se trouver suspendus dans l'eau, entre le navire et le point où le câble immergé précédemment commence à toucher le sol. Si donc le navire passe accidentellement sur un de ces hauts fonds, le câble y reposera très rapidement; et comme le mou est en moyenne de 10 à 12 p. 100, la partie encore suspendue se trouvera trop courte pour pouvoir épouser toutes les sinuosités du terrain, en arrière du haut fond ; elle restera donc définitivement en suspension dans la mer. On a constaté que, dans certains parages, les câbles atlantiques de 1865 et 1866 se sont trouvés effectivement dans ce cas et ces exemples ne sont pas uniques. M. A. Jamieson notamment a eu, en 1881, l'occasion de réparer, dans les mers du Levant, un câble qui avait été tendu au-dessus d'une véritable vallée sous-marine de 3 à 4 milles de longueur et dont l'existence n'avait pas été soupçonnée lors de la pose. Les cartes marines n'indiquaient aux environs de la rupture, qu'un seul sondage, fait avec une ligne de 200 brasses qui n'avait pas touché le fond. M. Jamieson y trouva 880 brasses de profondeur, et quelques milles plus loin, sur le tracé du câble, 1300 brasses. On peut se figurer quelle eût été, dans ces conditions, la durée d'un câble léger, et on ne peut, d'un autre côté, affirmer avec certitude que les sondages, si multipliés qu'ils soient, feront reconnaître toujours tous les hauts fonds et toutes les vallées.

La réparation des câbles légers, sans pouvoir être déclarée absolument impossible, serait, sans aucun doute, notablement plus difficile que celle des câbles ordinaires. On ne peut éviter, en effet, en draguant un câble, de le traîner sur le fond jusqu'à ce que sa présence soit devenue manifeste par la tension marquée au dynamomètre. La traction que supporte le câble à ce moment doit nécessairement encore augmenter, un navire, dont l'allure est même très modérée, ne pouvant être arrêté instantanément; si au contraire, pour soulager le câble, on dévire la drague trop brusquement, on risque de le faire échapper au grappin. Or, sans compter les chances d'accidents que comporte la pose d'un câble, lorsque l'opération se poursuit pendant huit ou dix jours, certains défauts de fabrication, malgré tout le soin qu'on y apporte, ne deviennent apparents qu'au bout d'un temps plus ou moins long, après l'immersion; d'autres avaries dues à la foudre, aux icebergs, aux animaux, à des mouvements de terrain, à des boucles qui se serrent peu à peu et finissent par former des coques (genre d'accidents d'autant plus à redouter que les câbles légers seraient posés avec plus de mou) se déclarent inopinément, à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un instant quelconque, et, suivant la gravité du défaut, exigent une réparation immédiate ou plus ou moins prochaine.

On conçoit donc le peu de faveur que les câbles légers ont rencontré jusqu'à présent auprès des capitalistes, malgré leurs promesses séduisantes, et il en sera probablement ainsi jusqu'à ce que l'on puisse compter avec quelque certitude sur la possibilité de les réparer. Des progrès dans la fabrication permettant d'éliminer complètement les défauts qui ne deviennent apparents dans la gaine de gutta-percha qu'avec le temps, et la découverte d'une matière pouvant servir d'enveloppe protectrice à l'âme et n'ayant les inconvénients ni du fer, ni du chanvre, nous rapprocheraient du jour où un essai d'immersion de câbles légers pourra être sérieusement tenté. Jusque-là, il sera toujours plus prudent de construire des câbles dont le prix de revient est, il est vrai, un peu plus élevé, mais dont l'immersion présente plus de sécurité et dont la réparation, en cas d'avarie, peut être considérée aujourd'hui presque comme certaine, au moins dans la majeure partie des cas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE V

ÉPISSURES

§ 1er. Soudure des ames. — Outillage. — Jonction des conducteurs en cuivre. — Soudure de l'enveloppe isolante : gutta-percha, caoutchouc.
§ 2. — Epissure des armatures en fer.

On donne le nom d'*épissure* à l'ensemble des opérations nécessaires pour rétablir la continuité, aussi parfaite que possible, des conducteurs en cuivre de deux câbles généralement semblables, de leurs enveloppes isolantes et de leurs couvertures extérieures, chanvre, fer, etc. Ces opérations ont une importance capitale dans la télégraphie sous-marine, un seul joint mal fait pouvant nécessiter des réparations extrêmement coûteuses et diminuer ainsi, dans une large proportion, la valeur commerciale du câble.

A la mer, le contrôle de ce genre de travaux est toujours plus sommaire qu'à terre, par suite de nécessités du service ou d'installations moins complètes ; dans certains cas, il devient même tout à fait illusoire. Lorsque l'on réunit en effet les bouts de deux sections de câbles immergées déjà toutes les deux et que l'épissure, une fois faite, doit être simplement jetée à la mer par-dessus bord, il devient à peu près impossible de faire un essai, même rudimentaire, de la valeur de la soudure ; le travail est donc exécuté par le soudeur, pour ainsi dire sans aucune vérification possible. On ne doit en conséquence employer comme soudeur, surtout à la mer, que des hommes non seulement parfaitement exercés, mais présentant toutes les garanties morales nécessaires.

§ 1er. — SOUDURE DES AMES

Une des conditions essentielles pour la bonne confection de la soudure d'une âme est une extrême propreté. Chacun n'est pas apte à devenir un bon soudeur, quelque habile même que l'on puisse être d'ailleurs de ses doigts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Certaines personnes transsudent, en effet, d'une manière permanente, par les pores de leur peau, une matière graisseuse : le soudeur, ne pouvant se dispenser de toucher fréquemment les parties de l'âme dont il effectue la jonction, déposerait inévitablement, s'il se trouvait dans ces conditions et malgré tous les soins de propreté qu'il pourrait prendre, sur le conducteur en cuivre et sur les couches de gutta-percha, une matière qui empêcherait un contact intime entre ces diverses parties.

Un soudeur doit toujours être accompagné d'un aide pour que, aussitôt la soudure commencée, il n'ait plus à toucher aucun objet étranger à son travail proprement dit.

OUTILLAGE

L'outillage nécessaire à la confection de la soudure des âmes comprend :

Un double chevalet,
Un fourneau de plombier,
Une grosse poche ou cuiller en fonte ou en fer,
Une petite cuiller en fer,
Une lampe à alcool,
Des fers à polir la gutta-percha,
Des pinces plates de diverses dimensions,
Couteaux, chiffons, résine ou stéarine, etc.

Le chevalet (fig. 125) se compose de deux petits étaux, montés sur une planchette en bois, en regard l'un de l'autre. On peut faire glisser ces étaux dans deux rainures longitudinales situées dans le prolongement l'une de l'autre et les fixer en un point quelconque de leur course à l'aide d'un écrou placé sous la planchette.

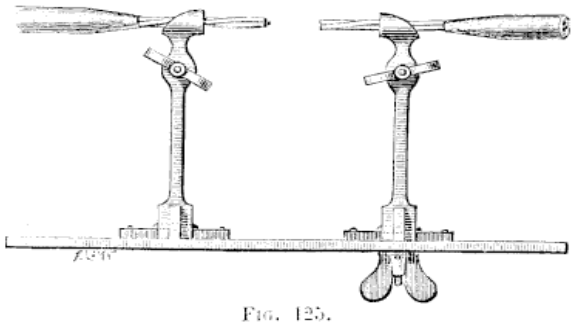


Fig. 125.

L'alliage, composé de 2/3 d'étain et de 1/3 de plomb, dont on se sert pour la jonction des conducteurs en cuivre, est fondu dans une grosse poche en fonte ou en fer que l'on chauffe sur un fourneau de plombier. C'est dans cette masse de métal fondu qu'on prélève, à l'aide d'une petite cuiller en fer, la quantité que l'on verse ensuite sur les parties du cuivre que l'on veut souder ensemble et que l'on a préparées ainsi qu'il sera expliqué plus bas.

La lampe à alcool sert à chauffer les fers à l'aide desquels on polit la gutta-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

percha et à ramollir cette matière. On peut faire usage d'une lampe à alcool quelconque, pourvu qu'elle donne une flamme suffisante, qu'elle ait une capacité assez grande pour pouvoir brûler pendant deux heures au moins et qu'elle soit bien dans la main de l'ouvrier. Le modèle suivant (fig. 126) a donné dans la pratique d'excellents résultats. Une sphère d'environ 8 centimètres de diamètre, aplatie en l'une de ses parties, de manière à former une

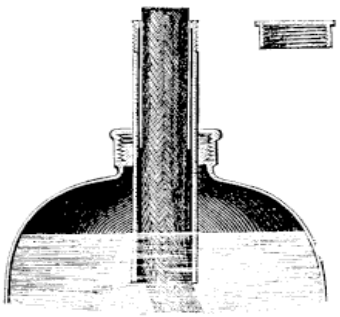


Fig. 126.

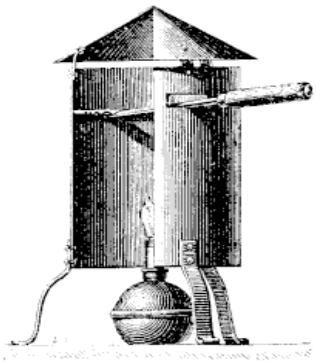


Fig. 127.

base, sert de récipient à alcool; elle est percée à sa partie supérieure d'un orifice taraudé, dans lequel on engage l'extrémité d'un tuyau portant à l'intérieur un tube plus petit séparé du premier par un intervalle libre. Une mèche de coton ronde traverse le tube central et plonge dans le liquide du réservoir, la partie annulaire vide, comprise entre les deux tubes, permettant à l'air extérieur de rentrer dans la lampe au fur et à mesure que le niveau de l'alcool s'abaisse dans le récipient. On peut visser sur ce double tuyau un couvercle qui ferme hermétiquement la lampe, de telle sorte que le liquide ne puisse s'en échapper durant les transports.

La lampe à alcool peut être recouverte d'un cylindre creux en tôle reposant sur trois pieds et surmonté d'un chapeau (fig. 127). Ce cylindre porte intérieurement, à mi-hauteur, un anneau plat au-dessus duquel sont percées, dans l'enveloppe cylindrique, diverses ouvertures ou fenêtres par lesquelles on introduit les fers à polir que l'on veut chauffer. Ces fers reposent à l'extrémité opposée du cylindre sur l'anneau et sont ainsi placés exactement au-dessus de la flamme de la lampe.

Les fers (fig. 128), en acier poli et très maniables, ont une section ovale à bords bien arrondis et sont fixés à un manche en bois léger. Les dimensions suivantes correspondent à un fer bien conditionné :

Longueur du fer	0,160	mètre
Largeur de l'extrémité libre	0,012	—
Largeur près du manche	0,017	—
Epaisseur au milieu	0,006	—

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le fer ne doit être, en aucun cas, chauffé sur un feu de charbon, dans un fourneau de plombier, et son usage doit être limité à étendre la composition Chatterton, à polir la gutta-percha et à en faire disparaître les coutures. On reconnaît qu'il est chauffé à la température convenable, à l'impression de

Fig. 128.

chaleur douce que l'on ressent en l'approchant de la joue, à une distance de quelques centimètres ; l'extrémité libre du fer présente, en outre, alors une teinte bleu pâle.

On taille la gutta-percha à l'aide de couteaux à fusains dont la lame doit être très tranchante ; on la passe sur la langue avant de s'en servir, pour éviter l'adhérence de la gutta au métal. L'excès de gutta des bandes que l'on applique sur l'âme est coupé avec une paire de ciseaux courbes humectée préalablement de la même manière.

JONCTION DES CUIVRES

La gutta des deux âmes à souder est enlevée à chaque extrémité (fig. 129), de manière à mettre le conducteur en cuivre à nu sur une longueur de 0,04 mètre environ. On a soin d'opérer avec les précautions nécessaires pour que les brins de cuivre ne soient pas tailladés par le couteau ; s'ils étaient entamés accidentellement, on devrait, sans hésitation, enlever à la pince coupante le bout d'âme dénudé et recommencer la taille de la gutta sur une partie nouvelle d'âme.

Fig. 129.

Les différents brins de la cordelette de cuivre sont alors nettement séparés les uns des autres en forme d'éventail et nettoyés chacun séparément, soit avec du papier d'émeri à grain très fin, soit avec le dos de la lame d'un couteau.

Le soudeur se lave les mains très proprement, et après les avoir essuyées, les plonge dans un bain de naphte qu'il laisse s'évaporer à l'air de manière à avoir les doigts parfaitement secs. Il trempe également dans le naphte les fils de cuivre et les laisse sécher.

Il refait ensuite, à l'aide d'une petite pince plate d'horloger, les torsades primitives sur un tiers environ de la longueur des brins de cuivre, dans le sens même de leur câblage, et en ayant soin de reconstituer une spire d'un pas égal à celui du toron fait en fabrique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette première partie de l'opération est commune à tous les procédés de jonction des cuivres. Différentes manières donnant toutes de bons résultats peuvent être employées pour marier ensemble les deux torons :

1° Les sept brins de chaque conducteur sont séparés en deux faisceaux (fig. 130), l'un de trois, l'autre de quatre fils ; tous les brins sont étalés en éventail et les deux groupes placés à un intervalle angulaire triple environ

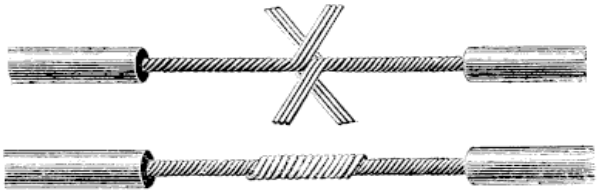


Fig. 130.

de celui correspondant à la largeur de l'un des groupes. Les torsades en cuivre des deux âmes sont amenées en contact de telle sorte que leurs axes soient dans le prolongement l'un de l'autre et que les quatre faisceaux de brins de cuivre s'entre-croisent. Ils sont tordus à la main alternativement autour des deux conducteurs sans se recouvrir ; l'excédent est coupé avec une pince. Pendant que l'on tient ensuite d'une main, solidement, avec une forte pince plate, le milieu de la ligature, on tord, de l'autre main, avec une petite pince semblable, successivement chaque partie de la torsade, de manière à assurer un bon contact entre les brins des anciens faisceaux et les torons centraux et à donner à l'ensemble une disposition régulière.

2° Les fils ayant été préparés comme ci-dessus, on coupe le brin central

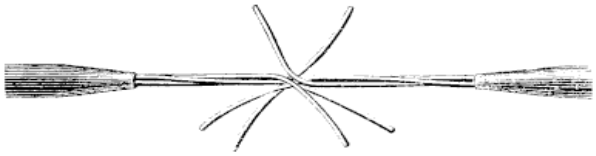


Fig. 131.

et on dispose les autres en forme de cône (fig. 131) : on les enchevêtre ensuite les uns dans les autres, de telle sorte que chaque brin de l'un des torons soit compris entre deux brins de l'autre toron. On amène au contact les têtes des deux cordelettes, et on enroule bien symétriquement en hélice les fils du premier cône sur le second toron, et inversement. L'enroulement est d'abord fait à la main, puis consolidé et régularisé à l'aide de pinces plates.

Ces deux méthodes, quoique donnant d'excellents résultats au point de vue du contact des cuivres et de la résistance mécanique de la jonction,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

augmentent dans une large mesure le diamètre du conducteur ; cet inconvénient, moins sensible pour les câbles souterrains, l'est davantage pour les câbles sous-marins, dont l'âme doit être enfermée dans une armature en fer de diamètre déterminé. Aussi emploie-t-on pour ceux-ci de préférence l'un des trois procédés suivants.

3° Les torsades des deux torons étant refaites sur deux tiers de leur longueur, on coupe sur l'un d'eux trois brins en alternant les fils conservés et les fils coupés et on place les quatre autres parallèlement à l'axe du conducteur ; on coupe ensuite les quatre brins correspondants du second conducteur

Fig. 132.

et on place parallèlement à l'axe les trois brins restants, en ayant soin de leur donner exactement la même longueur qu'aux quatre brins libres du premier toron. Les deux âmes sont rapprochées, chaque fil est introduit dans l'intervalle libre entre deux fils de l'autre toron et poussé à refus jusqu'au contact de la torsade opposée. On enveloppe le tout avec un fil de cuivre très fin que l'on enroule en hélice sur la jonction, et, de chaque côté de celle-ci, sur une longueur de la torsade égale à la jonction même.

4° Les torons (fig. 132) sont refaits soigneusement sur toute la longueur du conducteur, mis à nu et limés en sifflet sur un tiers de leur étendue. Les extrémités de ces torsades ayant été décapées avec les précautions qui

Fig. 133.

seront indiquées plus bas, on y applique un peu de soudure d'étain ; lorsqu'elle est refroidie, on lime chaque partie de façon à en enlever toutes les aspérités et à obtenir des biseaux dont l'extrémité soit bien effilée. On engage chaque torsade dans l'un des étaux du chevalet et on superpose les deux biseaux en les serrant fortement l'un contre l'autre. Par-dessus la jonction, et, de chaque côté, sur une longueur égale à celle-ci, on enroule un petit fil de cuivre (fig. 133) destiné à maintenir la communication dans le cas où la soudure des parties biseautées viendrait à manquer. On soude ensuite les deux parties amenées au contact l'une de l'autre.

5° Les deux torons sont placés sur le chevalet et rapprochés de manière à se superposer sur une moitié de leur longueur. On y choisit deux brins de cuivre formant l'un la continuation de l'hélice de l'autre et on les coupe en les faisant déborder de 2 millimètres environ l'un sur l'autre. On en lime

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les bords en sifflet, puis on les replace dans la position qu'ils occupent normalement sur le conducteur ; les parties biseautées sont appliquées l'une contre l'autre, et maintenues en place à l'aide d'un petit fil de cuivre très fin dont les bouts restent libres. On soude à l'étain la jonction : lorsqu'elle est froide, on déroule sans difficulté le fil fin, on lime les bords de la soudure, et on obtient un brin de cuivre du conducteur reconstitué. On opère de même avec les autres fils, en ayant soin d'espacer les soudures de façon à ce qu'elles soient uniformément réparties dans l'étendue de 2 centimètres où les deux torons se recouvrent. Il faut un ouvrier très exercé pour savoir bien choisir les brins de chaque cordelette qui doivent reconstituer naturellement le conducteur et surtout couper les fils à des longueurs telles qu'après la soudure, ceux-ci reprennent leur place dans le toron sans qu'aucun d'eux ne soit ni trop court ni trop long.

Cette méthode, qui a été appliquée d'abord par M. Richard, à l'usine de Bezons, est incontestablement supérieure à toutes les autres : le conducteur est très flexible à la jonction, aussi résistant en ce point que dans les parties non soudées (les fils ainsi traités, lorsqu'ils sont soumis à des essais de traction, cassent généralement en dehors de la soudure), d'un diamètre enfin exactement égal à celui du conducteur normal. Elle réunit conséquemment l'ensemble des conditions que l'on doit se proposer d'atteindre.

Soudures à l'étain.

Les jonctions une fois faites sont soudées à l'étain. Cette précaution, absolument indispensable si l'on réunit les fils suivant les quatrième et cinquième méthodes que nous venons d'exposer, a, dans les trois premières, l'avantage d'assurer toujours un bon contact métallique ; les variations de température tendent en effet à écarter l'une de l'autre les spires entrecroisées des fils non soudés et conséquemment à augmenter la résistance du conducteur en ce point. Tout le monde connaît les différences que présentaient, souvent dans une même journée, les anciens fils télégraphiques aériens, dont les bouts étaient simplement tordus l'un autour de l'autre sans interposition de soudure, et les difficultés de travail qui en résultaient. Un effet analogue serait à craindre pour les câbles sous-marins qui, essayés à 24° centigrades, sont immergés dans les profondeurs de la mer où ils peuvent trouver des températures de 2 à 3° centigrades seulement.

Le conducteur prêt à être soudé est nettoyé avec un peu d'esprit de bois ou de naphte, puis saupoudré à la main de résine ou mieux de stéarine. On prend à l'aide d'une cuiller une petite quantité de soudure d'étain que l'on a fait fondre préalablement dans une grande poche et on la verse à plusieurs reprises, en filets très minces sur la torsade, jusqu'à ce que tous les inter-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

valles en soient bien remplis. Immédiatement après, on frappe deux ou trois petits coups sur le câble pour en faire tomber les gouttelettes d'alliage non adhérentes et on recouvre le conducteur d'un linge mouillé, préparé à l'avance, pour éviter le retrait de la gutta-percha. On donne un coup d'une lime à grains très fins sur la partie soudée, lorsqu'elle est refroidie, de manière à en enlever toutes les aspérités et on procède à la soudure de l'enveloppe isolante.

SOUDURES DE L'ENVELOPPE ISOLANTE

Ames en gutta-percha.

Les soudures des âmes recouvertes de gutta-percha sont généralement faites à autant de couches de gutta qu'il en a été appliqué sur le conducteur en cuivre, pendant la fabrication de l'âme. L'ouvrier commence par couper, sur des rouleaux de gutta-percha de largeurs et d'épaisseurs convenables, des bandes ayant les dimensions voulues pour la couche à laquelle elles doivent correspondre. Pour des âmes de dimensions moyennes, ces bandes ont :

la 1re	0m,07 de long	sur	0m,015 de large
la 2e	0m,09	—	0m,020 —
la 3e	0m,11	—	0m,025 —

leur épaisseur est uniformément de 1 millimètre.

Les extrémités de la gutta sont taillées en forme de crayon, pour éviter de marier avec la gutta neuve les parties qui ont supporté la chaleur de la soudure à l'étain et dont les propriétés ont, par suite, pu être altérées. On réchauffe ensuite légèrement le conducteur métallique en agitant au-dessous la flamme de la lampe à alcool, mais en évitant avec beaucoup de soin tout contact de la flamme avec la gutta.

Pendant ce temps, l'aide soudeur ramollit au-dessus de la lampe l'extrémité d'un bâton de Chatterton ; le soudeur tamponne modérément avec ce bâton le conducteur en cuivre et en étend les parties restées adhérentes sur tout le conducteur en cuivre mis à nu, à l'aide d'un fer à polir chauffé à la lampe. Le fer, en sortant du chapeau, doit toujours être essuyé sur des chiffons très propres, avant d'être mis en contact avec la Chatterton ou la gutta.

On chauffe les bouts des enveloppes de gutta à raccorder, en promenant au-dessous, et toujours à distance, la lampe à alcool. On ramollit ainsi, de chaque côté de la soudure, environ 2 centimètres de gutta que l'on tire immédiatement après l'une vers l'autre, avec les doigts légèrement humectés de salive pour que la gutta ne puisse y coller. On réchauffe une seconde fois la gutta, s'il en est besoin, et on recouvre ainsi le conducteur d'une première couche très mince de matière isolante (fig. 134).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette première couche est tamponnée légèrement et à plus larges intervalles que le conducteur en cuivre, avec le bâton de Chatterton chauffé de nouveau à la lampe ; la composition est étendue et égalisée au fer sur la gutta. Pendant ce temps, l'aide a saisi avec une petite pince plate l'un des coins de la bande la plus courte et la plus étroite de gutta et l'a ramollie au-dessus de la lampe, en évitant de la surchauffer. Le soudeur la prend avec

Fig. 134.

les doigts toujours légèrement humectés de salive, et l'applique, à la main et par-dessous, contre l'âme du câble ; les bords en sont relevés de chaque côté et pressés l'un contre l'autre, de manière à envelopper complètement l'âme. Le soudeur serre ces bords vigoureusement entre ses doigts pour obtenir une adhérence bien complète de la nouvelle bande à l'ancienne gutta et tire à lui l'excédent de matière qu'il coupe avec une paire de ciseaux courbes dont il a passé le dos sur sa langue. Il ramollit de nouveau à la lampe cette couche de gutta et la pétrit ensuite avec les doigts humectés encore de salive. Le fer chauffé convenablement, ainsi qu'il a été expliqué, sert à faire disparaître les inégalités que l'on aperçoit sur la gutta et à produire une liaison intime des deux extrémités de cette couche avec les parties les plus voisines de l'ancienne gutta. Les mêmes opérations de réchauffement, de pétrissage et de polissage au fer se répètent un certain nombre de fois jusqu'à ce que la surface extérieure de la matière isolante paraisse sans défaut et que l'on ne voie aucune bulle de gaz se dégager de la gutta, sous l'action du pétrissage.

Fig. 135.

La seconde et la troisième couches de gutta se soudent exactement comme nous venons de l'expliquer pour la première. On doit seulement avoir soin d'appliquer le milieu de chaque bande sur la ligne longitudinale de raccordement de la ligne précédente de manière à croiser les points faibles des soudures (fig. 135). Il faut également éviter de ramollir les couches de gutta terminées en réchauffant les suivantes, afin que les nouveaux pétrissages ne puissent atteindre que la gutta soumise actuellement à ce travail. Les bandes de gutta sont d'ailleurs de plus en plus longues, pour que chacune d'elles recouvre toute la partie travaillée précédemment et soit soudée, à ses deux extrémités, sur des parties encore intactes des deux âmes.

Lorsque le pétrissage de la dernière couche est terminé, on la ramollit une dernière fois très légèrement ; le soudeur mouille bien la paume de sa main et astique vigoureusement la soudure pour lui donner le poli nécessaire. Il l'asperge d'eau largement et la laisse suspendue verticalement à l'air pen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dant vingt à vingt-cinq minutes pour lui permettre de se refroidir sans que le conducteur en cuivre puisse se décentrer. Lorsque l'on est pressé par le temps à la mer, on plonge la soudure dans un baquet d'eau ou même dans un mélange de glace et d'eau, pour activer son refroidissement.

Le soudeur doit avoir soin de toujours chauffer à la lampe les parties du joint qu'il a touchées avec ses doigts humides, avant de la recouvrir d'une autre couche de gutta ou de Chatterton, de manière à en faire disparaître toute trace d'humidité. Si par suite de l'élévation de la température ambiante les doigts du soudeur présentaient des traces de transpiration, il devrait avoir soin de les essuyer avec un linge bien propre, ou mieux encore les tremper dans du naphte dont l'évaporation rapide détermine un petit refroidissement de la peau. Cette opération serait répétée plusieurs fois durant le travail, s'il était nécessaire.

La gutta en bandes servant à la confection d'un joint doit être autant que possible de la même qualité que celle des âmes à jonctionner. Avec des guttas de qualités différentes, il est très difficile d'obtenir un joint bien homogène et de nombreux défauts de soudures n'ont été dus qu'à la dissemblance des matières employées, bien que de bonnes qualités, chacune individuellement.

Un joint à trois couches de gutta doit avoir 15 centimètres de longueur environ ; lorsqu'il est bien fait, il a la forme d'une olive très allongée et un diamètre légèrement supérieur seulement à celui de l'âme du câble. Sa section, examinée à la loupe, doit former, autour du conducteur en cuivre bien centré, une surface parfaitement unie, sans traces de bulles de gaz ou d'humidité. Si on fend la soudure longitudinalement, on doit trouver le cuivre exactement dans l'axe du fuseau et bien adhérent à l'enveloppe isolante : les différentes couches de gutta doivent être séparées par des lignes noires très fines de Chatterton et adhérer parfaitement les unes aux autres.

Les défauts que l'on rencontre dans les soudures des câbles sont dus principalement à :

Des coupures maladroites des brins de cuivre ;

Des torsades de conducteurs en cuivre mal faites ou mal limées ;

Une application défectueuse de la soudure d'étain ;

L'excentricité du conducteur en cuivre déterminée par un mauvais pétrissage ;

La non-adhérence du conducteur central à l'enveloppe isolante ;

Des bulles d'air restées entre les diverses couches de gutta et provenant d'un serrage imparfait de la bande ;

Un surchauffage de la gutta occasionné par l'application sans précaution de la lampe ;

La non-adhérence entre elles des couches de gutta et de Chatterton, par suite d'humidité restée interposée ou de défaut de propreté ;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Des écorchures provenant de causes accidentelles.

Des joints *provisoires*, surtout lorsqu'on est pressé par le temps à la mer, peuvent être faits dans une sorte de moule en bois, formé de deux pièces (fig. 136) entre lesquelles on place la partie d'âme que l'on veut recouvrir de gutta. Les bords taillés de l'ancienne matière isolante et le conducteur en cuivre ayant été préalablement chauffés à la lampe à alcool, on remplit le moule de gutta plastique, on serre à l'aide de vis et on laisse refroidir.

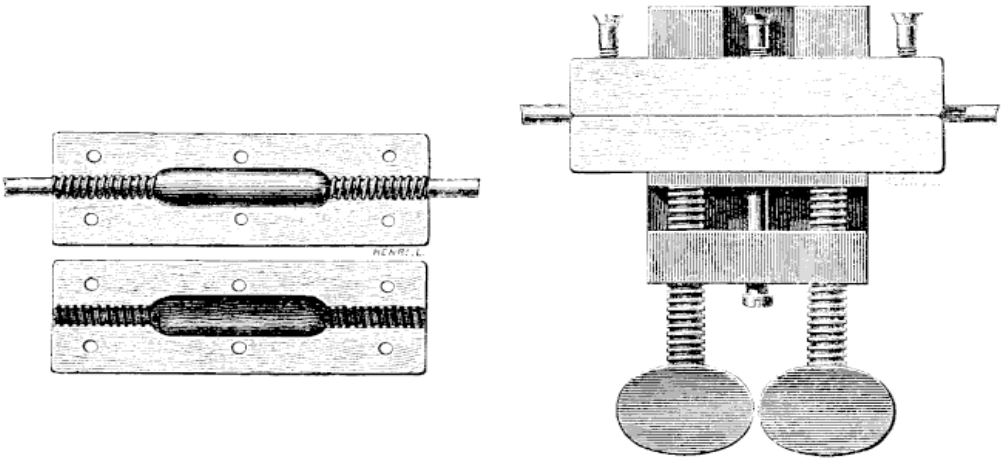


Fig. 136.

M. W. Smith a constaté qu'au bout de trois mois des soudures ainsi faites par un ouvrier ne connaissant pas le travail de la gutta-percha et restées exposées une partie du temps à l'air étaient encore aussi bonnes qu'au début, bien qu'essayées sous l'eau. Les soudures *définitives* des âmes de câbles sous-marins doivent toujours être faites par les procédés ordinaires.

Ames en caoutchouc.

On recouvre le conducteur en cuivre, soudé comme à l'ordinaire, d'une bande de coton destinée à isoler le métal du caoutchouc. On badigeonne les bords de l'enveloppe isolante, sur une longueur de 4 à 5 centimètres de chaque côté de la partie dénudée, avec un pinceau trempé dans du naphte, de la benzine ou du sulfure de carbone, de manière à dissoudre la surface externe du diélectrique. Par-dessus, on applique une bande de caoutchouc de l'épaisseur de l'enveloppe isolante et traitée préalablement de la même manière, de façon à obtenir la soudure par l'adhérence naturelle des parties fraîches du caoutchouc. On serre cette bande solidement contre le conduc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teur, on en coupe l'excédent et on produit par la simple pression des surfaces mises en contact une soudure longitudinale.

Pour faire un joint dans une âme en caoutchouc du système Hooper, on applique d'abord la couche interne de caoutchouc pur, comme il vient d'être expliqué. On le recouvre ensuite d'une bande de toile imprégnée d'oxyde de zinc sur laquelle on enroule deux bandes de caoutchouc saupoudrées de fleur de soufre, chacune d'elles débordant la couche précédente de 6 à 7 centimètres de chaque côté. On enveloppe le tout de trois bandes de calicot bien serrées et dont les bouts sont maintenus par du ciment de caoutchouc[1]. On porte le joint dans un bain de chaux ou de plâtre chauffé à 90 ou 100°, et dont on élève pendant un quart d'heure graduellement la température jusqu'à 155°. On l'y laisse pendant un autre quart d'heure; puis on l'en retire et on le laisse refroidir à l'air.

On remplace les deux bandes extérieures de calicot par des bandes neuves et on procède à l'essai du joint.

§ 2. — ÉPISSURE DES ARMATURES EN FER

Lorsque deux bouts de câbles semblables, armés de fer, A et B (fig. 137), doivent être épissés l'un sur l'autre, on fait, à 30 centimètres de distance environ, à partir de l'extrémité de l'un des câbles, A par exemple, une petite ligature à l'aide de fil de fer de 1 millimètre de diamètre, pour maintenir en place les enveloppes extérieures; puis on coupe au couteau les bandes de toile goudronnées, et à la lime chaque fil de fer individuellement. On met de côté les fils des deux couches intérieures de jute et de chanvre et on prépare l'extrémité de l'âme, supposée en parfait état, pour en souder successivement le cuivre et la gutta-percha sur les parties correspondantes du câble B.

On fait, en petit fil de fer, une ligature à une distance de l'extrémité du câble B qui varie avec la profondeur à laquelle l'épissure devra être immergée; dans les petits fonds, cette longueur est ordinairement de 3 mètres; dans les grands fonds, elle atteint jusqu'à 30 mètres. Après avoir coupé les bandes de toile goudronnées, on prend successivement chaque fil de fer de l'armature, on le tourne autour du câble un nombre de fois suffisant pour le retirer entièrement de son lit, en ayant soin de conserver au fil sa forme hélicoïdale; on enroule chacun d'eux en une glaine à assez grand rayon que l'on met en réserve pour l'employer plus tard.

[1] Le ciment de caoutchouc est une solution de 20 parties de caoutchouc ayant subi la mastication dans 100 parties de benzine ou d'huile de naphte minérale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le déroulement des fils de fer se fait quelquefois avec un instrument composé d'un collier en fer percé de trous et portant deux manettes aux extrémités d'un même diamètre : le collier est formé de deux pièces tournant autour d'une charnière et maintenues à l'aide d'une goupille que l'on engage dans des ouvertures pratiquées à cet effet sur chacune d'elles. On passe chaque fil de fer de l'armature du câble B dans l'un des trous du collier, l'âme même restant au centre : un homme s'avance ensuite vers la ligature *d* en tournant au fur et à mesure les deux manivelles autour du câble,

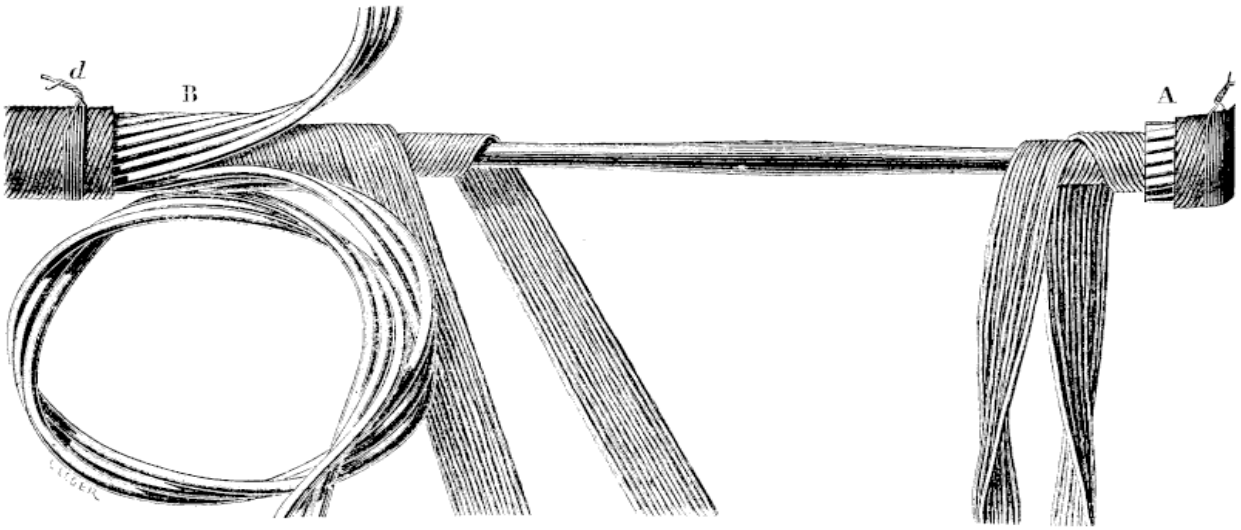


Fig. 137.

en sens inverse de l'hélice formée par les fils de fer de l'armature ; l'âme placée sur l'axe de rotation reste immobile. Un second homme suit le premier, à une petite distance, avec un appareil semblable, afin de maintenir les fils dans leur position relative.

L'emploi de cet instrument a l'inconvénient de détruire en partie au moins le pas hélicoïdal qu'il est important de conserver aux fils de fer.

Les deux enveloppes intérieures de jute ou de chanvre du câble B sont coupées à 60 centimètres environ de la ligature et l'âme à 30 centimètres environ. Celle-ci est soudée avec le plus grand soin sur l'âme du câble A : lorsque la soudure est refroidie à l'air, on la plonge dans un baquet d'eau froide pour achever de la solidifier et la soumettre aux essais électriques. On recouvre l'âme des deux couches de chanvre provenant des câbles A et B, en ayant soin de ne pas superposer les brins d'une même couche appartenant aux deux câbles ; il en résulterait une grosseur qui empêcherait les fils de fer de se remettre plus tard en contact les uns avec les autres. On doit,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'un autre côté avoir soin de couper les brins de chanvre à des longueurs telles qu'il n'y ait aucune discontinuité dans l'enveloppe au-dessus de la soudure même. Le chanvre de chaque couche est maintenu par un tréfilage en fils de caret à très longues mailles.

Les fils de fer de l'armature du câble B sont allongés ensuite et enroulés en hélice au-dessus de la soudure, soit à la main, soit à l'aide de l'instrument qui a servi à décorder les fils de fer, de façon à reconstituer aussi bien que possible l'armature primitive. Le câble est saisi en B entre les branches d'une pince dont le diamètre intérieur est précisément égal au diamètre extérieur du câble : un homme repousse à coup de marteau la pince vers A, en forçant ainsi les fils de fer à se serrer les uns contre les autres et à donner au câble une apparence plus régulière. Arrivé en A, on prend un fil de fer quelconque du câble B et on cherche la place qu'il devrait occuper sur le câble A : le fil correspondant de ce dernier câble est enlevé sur une longueur égale à celle de l'épissure, 30 mètres par exemple, coupé à l'extrémité et remplacé par le fil du câble B. Les extrémités libres de ces deux fils de fer, placées en regard l'une de l'autre, sont maintenues à l'aide d'une solide ligature de fil de fer de 1 millimètre. Quelquefois même, pour mieux empêcher le glissement du fil du câble B, on le fait sortir une ou deux fois de la ligature dans laquelle il rentre naturellement un nombre égal de fois. On opère de même pour le fil suivant de l'armature du câble B, en ayant soin seulement de l'arrêter et de le couper à 80 centimètres environ de l'extrémité du premier fil. On continue ainsi pour tous les autres fils.

L'ensemble de toute l'épissure est recouvert ensuite d'une bonne couverture en bitord serrée à la mailloche. Cette couverture doit déborder au moins d'un mètre, de chaque côté, toutes les parties des câbles A et B auxquelles il a été touché.

Lorsque les armatures des deux câbles à épisser sont très dissemblables, on fait ce qu'on appelle des *épissures en queue de rat*. A étant le câble le plus faible, on procède comme ci-dessus jusqu'au moment où, à l'aide de la pince, on a reformé l'armature du câble B, du point B au point A. A ce moment, on développe successivement les divers fils du câble B, mais sans toucher à ceux du câble A dont l'armature reste intacte jusqu'au point A : on arrête par des ligatures en fil de fer de 1 millimètre les extrémités des fils de fer du câble B et on recouvre le tout de bitord comme précédemment.

Quelquefois on arme encore l'épissure d'une *bosse :* les deux bouts du câble comprenant entre eux l'épissure sont reliés par une corde en chanvre, solidement attachée à chacun d'eux à ses deux extrémités et un peu plus courte que l'épissure, afin que toute la traction s'exerce sur la corde. Cette précaution n'a d'utilité que pour l'immersion même de l'épissure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

SPÉCIFICATIONS DE CÂBLES SOUS-MARINS

POINTS EXTRÊMES DES CÂBLES	DATES de la pose.	LONGUEUR posée en milles marins.	POIDS PAR MILLE MARIN					REMARQUES
			Cuivre en kilogrammes.	Gutta-percha en kilogrammes.	Fer en tonnes.	Jute en tonnes.	Asphalte, etc. en tonnes.	Total en tonnes.	
Minou — Saint-Pierre.	1869	2618	181,13	181,13		0,106		1,678	Mer profonde.
Marseille — Alger.	1871	199	18,531	73,376	3,813	0,914	0,475	1,631	Atterrissement.
			»	»	1,076	0,068	0,236	1,339	Mer profonde.
Lizard — Bilbao.	1873	619	54,131	79,378	10,026	0,367	1,529	12,192	Atterrissement.
			»	»	3,131	0,236	0,762	6,706	Intermédiaire.
			»	»	2,730	0,094	0,482	3,136	id.
			»	»	1,920	0,190	0,119	2,672	id.
			»	»	0,623	0,096	0,859	1,721	Mer profonde.
Valentia — Heart's content. . .	1873	1876	181,13	181,13	17,710	1,711		19,813	Atterrissement.
			»	»	9,796	0,631	2,094	12,830	Intermédiaire.
			»	»	3,101	0,167	0,206	4,139	id.
			»	»	2,138	0,091	0,291	3,309	id.
			»	»	0,673	0,119	1,097	2,282	Mer profonde.
Lisbonne — Madère.	1873	613	54,131	79,378	9,602	0,762	1,328	11,882	Atterrissement.
Madère — Saint-Vincent. . . .	1874	1196	»	»	2,730	0,263	0,477	3,136	Intermédiaire.
			»	»	1,920	0,190	0,119	2,672	id.
			»	»	0,616	0,139	0,953	1,878	Mer profonde.
Jamaïque — Porto Rico. . . .	1874	617	48,394	63,303	9,617	0,615	1,982	11,636	Atterrissement.
			»	»	3,236	0,121	0,142	3,891	Intermédiaire.
			»	»	1,163	0,096	0,302	1,673	Mer profonde.
Saint-Vincent — Pernambouc.	1874	1811	113,07	151,42	9,602	0,774	1,328	12,005	Atterrissement.
			»	»	1,930	0,190	0,119	2,810	Intermédiaire.
			»	»	1,382	0,064	0,293	2,011	id.
			»	»	0,716	0,135	1,101	2,224	Mer profonde.
Valentia — Heart's content. .	1874	1837	181,13	181,13	17,710	1,711		19,813	Atterrissement.
			»	»	3,101	0,167	0,506	4,188	Intermédiaire.
			»	»	0,673	0,119	1,097	2,382	Mer profonde.
Bolany Bay — Nelson.	1876	1282	18,331	63,303	10,026	0,660	1,138	11,908	Atterrissement.
			»	»	2,713	0,096	0,613	3,397	Intermédiaire.
			»	»	1,077	0,081	0,157	1,727	id.
			»	»	0,613	0,203	0,386	1,316	Mer profonde.
Marseille — Bône.	1877	463	48,334	63,303	9,957	0,660	1,138	11,867	Atterrissement.
Bône — Malte.		382	»	»	2,916	0,218	0,417	3,751	Intermédiaire.
			»	»	1,079	0,116	0,302	1,613	Mer profonde.
Penang — Hanqoon.	1877	833	48,334	63,303	9,957	0,157	1,676	12,302	Atterrissement.
			»	»	2,896	0,121	0,192	3,636	Intermédiaire.
			»	»	1,077	0,091	0,296	1,579	Mer profonde.
Aden — Bombay.	*1877*	*1888*	*81,616*	*108,86*	*11,382*	*0,705*	*0,279*	*12,026*	*Atterrissement.*
			»	»	*9,970*	*0,121*	*1,177*	*15,132*	*id.*
			»	»	*5,475*	*0,285*	*0,298*	*6,619*	*Intermédiaire.*
			»	»	*2,879*	*0,113*	*0,383*	*3,761*	*id.*
			»	»	*0,636*	*0,203*	*0,248*	*1,288*	*Mer profonde.*
Poinle du Hoc — Pennedepie.	*1877*	*8*	*54,134*	*79,378*	*10,111*	*0,284*	*0,286*	*12,284*	*Atterrissement.*
									à double armure.
Malte — Alexandrie.	1879	1058	18,331	63,303	10,316	0,686	1,012	12,336	Atterrissement.
			»	»	3,314	0,106	0,793	6,636	Intermédiaire.
			»	»	2,818	0,229	0,363	3,731	Mer profonde.
			»	»	1,800	0,117	0,308	2,237	id.
Aden — Zanzibar.	1879	1908	113,39	113,39	10,316	0,686	1,012	12,174	Atterrissement.
			»	»	3,314	0,106	0,793	6,710	Intermédiaire.
			»	»	2,818	0,117	0,636	4,111	id.
			»	»	0,623	0,190	0,323	1,165	Mer profonde.
			»	»		0,130	0,373	1,932	id.
Marseille — Alger.	1879	195	18	63				3,114	Atterrissement.
	1880	488	»	»				1,514	Mer profonde.
Brest — Saint-Pierre.	1879	2212	219,999	180,077	0,860	0,079	0,500	1,139	Mer profonde.
Banjowangi — Port Darwin. .	1880	1131	18,331	63,303	10,316	0,686	1,012	12,336	Atterrissement.
			»	»	2,818	0,229	0,363	3,731	Intermédiaire.
			»	»	0,864	0,021	0,308	1,291	Mer profonde.
Valentia — Heart's content. .	1880	1423	136,07	136,07	0,874	0,117	0,737	1,998	Mer profonde.
			»	»	0,731	0,117	0,716	1,836	id.
Singapore — Batavia.	1881	537	18,331	63,303	10,316	0,686	1,012	12,336	Atterrissement.
			»	»	2,816	0,229	0,363	3,731	Mer profonde.
Valentia — Greisiel.	1882	841	38,907	38,967	12,091	0,339	0,406	13,174	Atterrissement.
			»	»	5,699	0,336	0,613	6,837	Intermédiaire.
			»	»	2,820	0,127	0,307	3,576	Mer profonde.

* D'après Rankine. *Tables and Rules.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TROISIÈME PARTIE

IMMERSION ET RÉPARATION DES CABLES SOUS-MARINS

CHAPITRE VI

MACHINERIE

§ 1er. Navires télégraphiques.
§ 2. Cuves. — Lovage des câbles. — Changement de cuve durant l'immersion d'un câble. — Calcul de la longueur de câble lové dans une cuve.
§ 3. Machine de pose. — Appareils de retenue. — Tambour. — Frein. — Dynamomètre; appareil enregistreur des tensions. — Machine à vapeur. — Roue d'immersion.
§ 4. Machine de relèvement. — Passage d'un câble de l'arrière à l'avant du navire ou inversement.

§ 1er. — NAVIRES TÉLÉGRAPHIQUES

La flotte télégraphique affectée à la pose et à l'entretien des câbles sous-marins, et créée en majeure partie après la célèbre campagne faite par le *Great Eastern* dans l'Atlantique, en 1866, comprend aujourd'hui une trentaine de navires de toutes dimensions.

Quelques-uns d'entre eux, en raison de leur tonnage élevé, peuvent embarquer une longueur considérable de câble et sont ainsi éminemment propres à l'immersion, dans l'océan, des grandes lignes atlantiques ; mais, par suite de leur masse, de leur grand tirant d'eau, de leur moindre facilité d'évolution et des dépenses plus considérables qu'entraîne leur armement, conviennent moins bien aux réparations, même en mer profonde, et à tous les travaux qui s'exécutent dans le voisinage des côtes. D'autres, d'un tonnage relativement faible, sont, au contraire, exclusivement affectés par les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Compagnies et les gouvernements propriétaires de câbles, à l'entretien de leurs lignes sous-marines : ils stationnent tout armés dans un port à proximité de ces lignes, toujours prêts à se porter sans délai sur le lieu d'une avarie, dès qu'elle leur est signalée, pour la réparer le plus promptement et le plus économiquement possible.

D'autres navires enfin, intermédiaires comme tonnage entre les précédents, sont employés à la fois aux immersions et aux réparations. Ils ne peuvent porter de très grandes quantités de câbles ; mais les longues lignes, lorsqu'elles n'ont pas à franchir une étendue d'eau considérable, comme l'Atlantique, étant divisées en sections, de manière à en faciliter l'entretien et l'exploitation et à en augmenter le trafic, ces navires peuvent ou revenir plusieurs fois à leur port d'attache, pour prendre de nouveaux chargements de câbles qu'ils immergent successivement, ou se faire accompagner par des transports qui leur fournissent, au fur et à mesure que leurs cuves se vident, le câble nécessaire à la constitution des différentes sections de la ligne. Ce dernier système a l'inconvénient de nécessiter plusieurs lovages et par suite de déformer les câbles dont la pose devient ainsi plus difficile. Il est prudent de n'y recourir que lorsque l'immersion ne doit pas se faire dans des eaux très profondes.

Pendant longtemps les navires affectés aux opérations de télégraphie sous-marine étaient simplement choisis, parmi ceux qui existaient déjà dans le commerce, d'après leur tonnage, la facilité avec laquelle ils devaient se prêter à l'installation des cuves et des machines et l'ensemble de leurs qualités nautiques : on leur faisait subir ensuite des transformations plus ou moins importantes, de manière à les adapter le mieux possible à leur nouveau service. Mais on reconnut bientôt que les exigences de ce service étaient si étendues et si multipliées qu'il ne devenait possible d'y satisfaire qu'en construisant des navires entièrement neufs dont les plans étaient conçus en vue de cette affectation spéciale.

D'une part, en effet, le pont supérieur doit être libre, sur une certaine largeur au moins, dans toute sa longueur, de l'extrême avant à l'extrême arrière du navire, soit pour donner passage au câble, soit pour faire place aux machines de pose et de relèvement ; d'autre part, il faut pourvoir à l'installation de vastes cuves en fer, destinées à recevoir les câbles, qui sont souvent de modèles différents et dont chaque type particulier doit être toujours accessible. Ces cuves, dont les dimensions doivent être les plus grandes possibles et ne sont limitées que par celles du navire même, doivent en outre occuper des emplacements tels que toutes chargées, elles ne puissent nuire à la stabilité du bâtiment. D'autres cuves plus petites sont nécessaires pour les cordages de dragues et de bouées et des magasins doivent en outre être réservés pour les chaînes en fer, les grappins, les champignons, les petites

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bouées, les cordages en chanvre et tout le menu outillage ; les grandes bouées restent ordinairement placées sur le pont ou sont attachées aux haubans des mâts. Le navire doit enfin pouvoir marcher, avec une égale facilité, soit en avant, soit en arrière, et recevoir commodément du lest en route même, au fur et à mesure qu'il se trouve allégé par le câble déroulé, de façon à rester dans de bonnes conditions de stabilité et de navigation. Un pareil programme implique une forme particulière pour la coque et des dispositions de machines toutes spéciales, qui ne peuvent être obtenues sur un navire existant, quelles que soient les transformations que l'on puisse se proposer de lui faire subir.

La *Compagnie Hooper*, la première, comprit l'importance de ces considérations et fit construire, en 1872, un grand navire de 5000 tonneaux, le *Hooper*, dont les cuves, liées à la membrure du navire, furent installées en même temps que le navire lui-même. L'année suivante, MM. Siemens frères firent mettre en chantier, en vue de l'immersion, en 1874, d'un nouveau câble atlantique, pour le compte de la *Direct United States cable C°*, un bâtiment de 6000 tonneaux qui reçut le nom de *Faraday,* et qui, doté par eux de tous les perfectionnements que comportaient à la fois l'architecture navale et la mécanique industrielle, est resté jusqu'à présent le type le plus parfait des navires de ce genre. Le *Faraday* mesure 120 mètres de long, 17 mètres de large et 12 mètres de profondeur. Des parois toutes droites lui ont assuré une vaste capacité et ont permis d'y installer trois énormes cuves de 13 mètres de diamètre sur 9 de profondeur, placées l'une à l'arrière et les deux autres à l'avant. Ces cuves, faites de plaques de fer rivées les unes sur les autres, forment comme une double rangée de voûtes arc-boutées contre les parois du navire, ce qui lui donne une solidité exceptionnelle : elles sont, en outre, reliées entre elles et à l'ensemble de la coque par cinq ponts métalliques dont le premier et celui du milieu sont doublés en bois pour les convenances de l'équipage. La coque est double et l'intervalle compris entre ses deux parois est occupé par une forêt de poutres et de solives en fer qui supportent les cuves et renforcent dans le sens longitudinal l'ensemble de la membrure du bâtiment. Cet intervalle est encore divisé transversalement en compartiments étanches que l'on remplit d'eau lorsqu'il devient nécessaire de lester le navire. Tous ces compartiments, de même que les cuves, peuvent être vidés, chacun séparément, à l'aide d'une pompe à vapeur : un jeu très complet de conduites munies de robinets est installé à cet effet à demeure dans toute la longueur du bâtiment ; le tout est parfaitement étiqueté et repéré, de telle sorte que les différentes manœuvres en peuvent être faites sans aucune hésitation. Tout en plaçant ainsi le navire dans les meilleures conditions de stabilité durant l'immersion même d'un câble, la Compagnie réalise encore une économie à la fois de temps et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'argent, puisque le bâtiment, une fois ses opérations terminées et sa provision de charbon complétée, le cas échéant, peut reprendre immédiatement la mer.

Le *Faraday* n'a pas de quille proprement dite; mais deux fausses quilles limitent, de chaque côté, l'amplitude des roulis. Extérieurement, il diffère encore des autres navires en ce que son avant et son arrière sont exactement semblables l'un à l'autre. Il est muni d'un gouvernail à chacune de ses deux extrémités, et peut ainsi aller soit en avant, soit en arrière, suivant les besoins, avec une égale facilité. Ces deux gouvernails sont manœuvrés chacun soit par une machine à vapeur, soit à bras, au cas où une avarie accidentelle surviendrait à la machine. Deux groupes distincts de machines Compound, avec condenseurs à surface, actionnent deux hélices parallèles indépendantes l'une de l'autre, ce qui permet de faire tourner le navire presque sur place, avantage précieux dans les opérations de relevage et dans celles de pose des atterrissements. Enfin, toutes les grosses manœuvres d'ancres, de chaînes, de bouées, canots, etc., se font à l'aide de petits treuils à vapeur disséminés dans toute la longueur du pont. Au-dessus de la passerelle la plus élevée, en un point aussi éloigné que possible de la masse de fer variable contenue dans le navire, se trouve un compas de sir W. Thomson qui sert de régulateur aux autres compas. Les navires chargés de procéder à une immersion étaient précédemment accompagnés toujours d'un second navire, dont la mission se bornait à leur indiquer la route et à leur prêter l'aide dont ils pouvaient éventuellement avoir besoin : cette dépense se trouve ainsi évitée.

Un réseau télégraphique très complet permet, en outre, de transmettre rapidement des ordres dans toutes les parties du navire.

En 1879, MM. Siemens frères ont fait construire, pour la *Compagnie française du Télégraphe de Paris à New-York*, un second navire de dimensions plus réduites que le *Faraday*, mais aménagé d'une manière analogue. Ce navire appelé *Pouyer-Quertier*, du nom du président de cette compagnie, possède également deux hélices indépendantes et deux gouvernails mobiles à volonté soit à bras, soit à la vapeur : sa vitesse normale est de 10 nœuds à l'heure. Ses dimensions principales sont : longueur 85 mètres, largeur 12 mètres, profondeur 8 mètres, poids du chargement 1800 tonnes. Le *Pouyer-Quertier* contient deux cuves principales, outre plusieurs cuves secondaires pour les filins de dragues et de bouées et les câbles relevés. Les machines de pose et de relèvement du *Pouyer-Quertier*, de même que celles du *Faraday*, ont été établies dans les conditions les plus parfaites connues à ce jour, de sorte que si le *Faraday* constitue le modèle du navire de pose des grandes lignes sous-marines, le *Pouyer-Quertier* peut être considéré comme le type du navire de réparation ou d'entretien.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces machines, bien que présentant une certaine diversité sur les différents navires, comprennent aujourd'hui encore les mêmes organes essentiels que celles qui ont servi, il y a 25 ou 30 ans, à la pose des premiers câbles atlantiques. De nombreux perfectionnements de détails y ont été introduits toutefois : on a notamment ou complètement supprimé ou allégé, dans la mesure où il a été possible de le faire sans en compromettre la solidité, toutes les parties susceptibles de former volants. C'est même là le caractère distinctif essentiel des machineries modernes : le déroulement peut ainsi être arrêté plus rapidement et on évite surtout que le câble, entraîné par la machinerie elle-même, ne devienne mou sur le tambour et ne glisse, entraîné par le poids de la partie suspendue dans l'eau, sans qu'il soit possible de l'arrêter. Ce genre d'accidents s'était reproduit fréquemment pendant les premières immersions en eau profonde, dans la Méditerranée.

La disposition d'ensemble des machines de pose et de relèvement étant déjà connue, nous allons en étudier successivement toutes les parties; nous nous occuperons ensuite des engins spéciaux employés dans les opérations de pose et de relevage des câbles, bouées, chaînes, grappins, filins de bouées et de dragues, machines à sonder, etc. Nous exposerons enfin la théorie mécanique de l'immersion des câbles sous-marins, les différentes méthodes employées pour poser les atterrissements et celles suivies pour les réparations soit aux abords des côtes, soit en mer profonde.

§ 2. — CUVES

Les cuves sont faites en plaques de fer d'un centimètre environ d'épaisseur, rivées les unes sur les autres et consolidées extérieurement à l'aide de fers cornières. Elles doivent être parfaitement étanches et disposées de manière à être, à volonté, remplies d'eau ou vidées avec la plus grande facilité. Le fond, au lieu d'être plat, en est légèrement bombé et forme une cuvette dans laquelle viennent se rassembler les eaux; une ouverture, munie d'un robinet et placée au point le plus bas, permet de vider entièrement la cuve et de la nettoyer à fond, lorsqu'elle ne contient pas de câble.

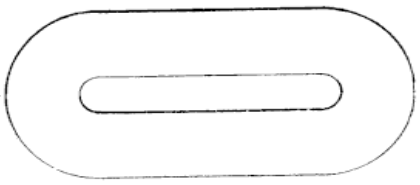


Fig. 138.

Les cuves ont généralement la forme de cylindres à section circulaire. Quelquefois cependant la disposition du navire oblige de leur donner une section ovale; parfois aussi elles comprennent une partie droite, plus ou moins longue, terminée par deux parties demi-circulaires (fig. 138).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Suivant l'axe des cuves est disposé un tronc de cône en tôle, légèrement évasé par le bas, ayant au moins 2 mètres de diamètre à la base, afin que la flexion des premiers tours du câble ne soit pas trop vive, et terminé à sa partie supérieure par une base plate dont les bords sont légèrement arrondis. C'est contre les parois de ce tronc de cône que, par abréviation, on appelle

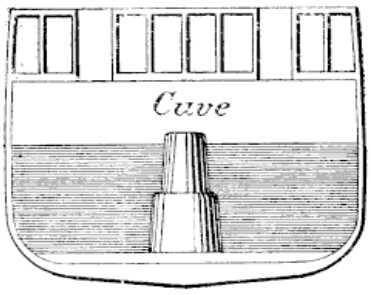


Fig. 139.

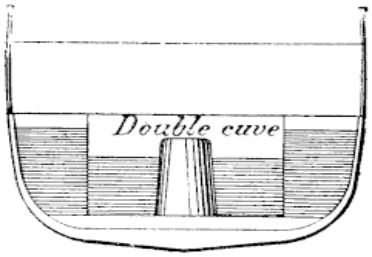


Fig. 140.

d'ordinaire simplement *cône*, que le câble s'élève verticalement en se déroulant. Pour les gros câble d'atterrissement, on recouvre quelquefois le cône fixe d'un cône mobile en bois et à claire-voie (fig. 139) destiné à augmenter le diamètre des premières loves. Quelquefois deux cuves sont emboîtées l'une dans l'autre (fig. 140) ; la cuve intérieure contient des filins de dragues ou de bouées et ses parois servent de cône à la cuve extérieure dans laquelle

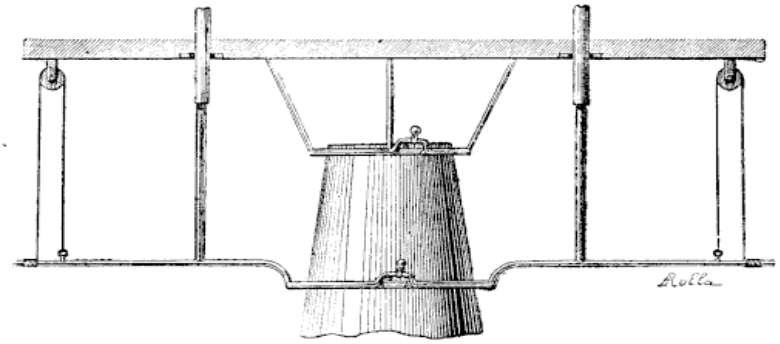


Fig. 141.

on peut lover de très gros câbles. L'intérieur des cônes est souvent employé comme caisse à eau pour conserver à bord de l'eau fraîche lorsqu'on traverse les mers équatoriales.

Pour empêcher plusieurs tours de câble de se soulever à la fois, par suite de l'adhérence due à la composition bitumeuse, et éviter les grands coups de fouet de la partie soulevée, sous l'action de la force centrifuge, le câble est guidé par des cercles horizontaux en fer tubulaire ; leur nombre varie de 2 à 4. Le premier, très voisin de la petite base du cône et d'un dia-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mètre intérieur un peu supérieur seulement à cette base, est fixé (fig. 141) invariablement par des supports extérieurs au plafond de la cuve ; les autres, un peu plus grands que la grande base du cône, sont reliés chacun à quatre traverses horizontales en fer creux, arrondies à leurs points d'attaches sur le cercle ; leur extrémité opposée libre est mobile à l'intérieur de rainures verticales pratiquées dans les parois de la cuve. Des tubes creux verticaux, fixés aux traverses et s'emboîtant les uns dans les autres, passent à travers le pont du navire et servent de guides supplémentaires. Une corde attachée aux traverses s'enroule autour de poulies fixées au plafond et permet d'abaisser ou de relever à volonté chaque cercle. Le plus bas d'entre eux doit toujours se trouver à 40 ou 50 centimètres au plus de la couche de câble qui se déroule. Les deux cercles intermédiaires ne sont utiles que lorsque, par suite de la grande hauteur de la cuve, et conséquemment de la trop grande distance entre les deux cercles extrêmes, le câble des couches les plus basses est exposé à fouetter trop vivement le long du cône.

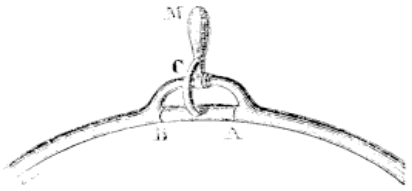


FIG. 142.

Chaque cercle présente, en un de ses points, une partie saillante destinée à recevoir, pendant le déroulement, le bout inférieur du câble lové dans la cuve. Ce bout doit nécessairement être libre pour que l'on puisse, d'une part, procéder aux essais électriques avant et durant l'immersion, et, d'autre part, l'épisser en cours même d'immersion, sur l'extrémité supérieure du câble enroulé dans une cuve voisine, sans qu'il soit nécessaire de laisser le navire stoppé en pleine mer pendant les trois ou quatre heures que demande la confection d'une longue épissure.

A cet effet, chaque cercle (fig. 142) est coupé, en deux points voisins A et B, par des sections faites toutes deux normalement au plan du cercle, mais dont l'une est normale à la circonférence en A, tandis que la seconde lui est oblique en B. Une tige M C munie d'une manette est fixée à l'arc A B et peut tourner autour de son extrémité C, à l'aide d'une charnière que porte la pièce en fer recourbée A C B montée sur le cercle. Une targette A maintient ordinairement en place l'arc A B qui se raccorde exactement avec le cercle A B et ne peut faire aucune saillie à l'intérieur. On le fait tourner autour de la charnière C lorsqu'on veut transporter le câble de la pièce A C B à l'intérieur du cercle ou inversement.

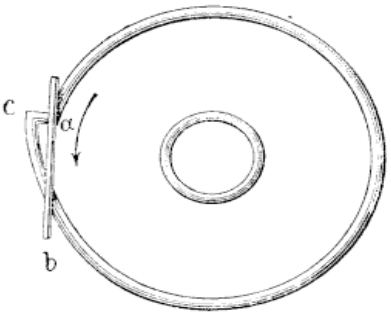


FIG. 143.

Quelquefois l'arc A B manque complètement en un ou plusieurs points du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cercle ; celui-ci est alors prolongé par une partie radiale *ac* (fig. 143) et un arc de spirale *bc* qui se raccorde exactement au cercle en *b* ; le tout est disposé de telle sorte que le câble, en se déroulant dans le sens de la flèche, ne puisse jamais venir buter contre la partie droite *ac*. Pour plus de sûreté, on complète le cercle, pendant le déroulement, par une pièce en fer que l'on attache avec du bitord, à la place laissée libre par l'arc manquant *ab*.

Fig. 144.

Sur le prolongement de l'axe de chaque cuve se trouve une bague en fonte à bords bien arrondis (fig. 144) formée de deux pièces dont l'une est mobile autour de l'autre et maintenue en place à l'aide d'une goupille.

LOVAGE DES CABLES DANS LES CUVES

Le câble, soutenu de distance en distance par de petites poulies, arrive des cuves de l'usine sur le navire et fait un ou deux tours sur un tambour placé au-dessus de la cuve dans laquelle il doit être enroulé. Ce tambour, muni d'un compteur, est actionné par une machine à vapeur. Pour éviter un déroulement accidentel trop rapide du câble, dû à des variations brusques dans la marche de la machine, et les coques qui en pourraient être la conséquence, au lieu de faire agir la machine directement sur le tambour, on lui fait commander une poulie entourée d'un frein : les deux extrémités de la bande d'acier de ce frein forment une charnière dans laquelle on engage un axe qui est relié au tambour à l'aide d'une manivelle. On règle la tension du frein de telle sorte qu'au delà d'une certaine vitesse le frein ne soit plus entraîné par la poulie : le tambour se trouve alors arrêté.

Lorsqu'on embarque de gros câbles d'atterrissement, on remplace le tambour par une poulie à gorge surmontée d'une poulie jockey, afin de ne pas briser le câble sur une circonférence à petit rayon.

Le bout du câble descend à l'intérieur des cercles jusqu'au fond de la cuve et remonte le long de ses parois : on en met en réserve 50 à 60 mètres que l'on attache au plafond. On en commence ensuite le lovage sur le fond en partant des bords extérieurs et serrant les tours les uns contre les autres, jusqu'à ce que l'on arrive au cône. A ce moment, on fait repartir le câble tangentiellement à celui-ci, par-dessus la première couche jusqu'aux parois de la cuve et on commence le lovage de la seconde couche. De petites lattes en bois sont placées de chaque côté du retour de câble pour former à la seconde couche, dans le voisinage de ce retour, une sorte de plan incliné qui empêche le poids des couches supérieures de la détériorer. On opère de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

même pour les couches suivantes en ayant soin de diriger les retours successivement dans tous les azimuths, pour que les diverses couches successives forment une surface plane et horizontale.

Chaque couche, dès que le lovage en est terminé, est badigeonnée avec un lait de chaux, pour éviter l'adhérence qui serait due à la composition bitumineuse dont le câble est recouvert.

Les marques en cuir ou en gutta-percha que l'on a attachées à l'usine sur le câble, en tous les points correspondant à une soudure de l'âme, et de mille en mille, sont vérifiées et renouvelées en cas de besoin ; les épissures sont peintes en rouge, au minium. Leurs positions sont soigneusement notées et reportées sur un registre dont nous donnons le modèle ci-après.

Navire le. . . . . . .

Cuve n°

Câble de. . . . . . *à.* . . . . . .

MODÈLE N° 3

DATES	NUMÉROS DES COUCHES	NOMBRE DE TOURS PAR COUCHES	MARQUES DES JOINTS		MARQUES DES MILLES		ÉPISSURES		LONGUEUR DU CABLE EN MILLES MARINS	OBSERVATIONS
			Numéro du joint	Nombre de tours jusqu'au joint	Numéro du mille	Nombre de tours jusqu'à la marque	Numéro de l'épissure	Nombre de tours jusqu'à l'épissure		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Signature :

Au-dessus de la seconde couche de câble, comptée à partir du bas de la cuve, on place d'ordinaire deux ou trois pièces de grosse toile, afin que, durant le déroulement, on soit averti, en temps utile, de l'épuisement prochain de la cuve, et que l'on puisse prendre des dispositions en vue du changement de cuve.

On remplit, en outre, la cuve d'eau, au fur et à mesure que les couches de câble s'élèvent, de telle sorte que l'eau vienne toujours affleurer la couche que l'on enroule.

L'état électrique du câble enfin est mesuré immédiatement avant et immédiatement après son embarquement, à l'aide d'appareils placés à l'usine, ces appareils étant plus sensibles que ceux employés à bord. Pendant tout le temps de l'embarquement même, on mesure avec soin l'isolement du diélectrique, et l'on s'assure de la continuité du conducteur.

Lorsque le lovage est terminé, le câble est entièrement noyé sous l'eau et la cuve fermée. On renouvelle l'eau de temps en temps pour éviter les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mauvaises odeurs qui pourraient résulter de la fermentation des matières textiles qui recouvrent l'âme. Mais on a soin, surtout lorsque la température extérieure est élevée, de ne pas vider la cuve entièrement, même pour la remplir d'eau immédiatement après. Il est préférable d'en extraire une hauteur de 1 mètre environ, qu'on remplace par de l'eau fraîche ; celle-ci, par sa différence de densité, ne tardant pas à tomber au fond, on épuise une nouvelle quantité d'eau qu'on remplace de même et on continue ainsi jusqu'à ce que l'on puisse considérer toute l'eau comme suffisamment pure.

Pour mesurer la température de l'eau des cuves à diverses profondeurs, M. Siemens dispose de distance en distance dans la cuve, pendant le lovage, de petites bobines de fil de cuivre recouvert, dont les bouts restent en dehors de la cuve, et dont les résistances électriques à la température de 24° C. sont exactement connues. La mesure de la résistance du cuivre de ces bobines permet ensuite d'en déduire très exactement la température du milieu dans lequel elles sont plongées.

CHANGEMENT DE CUVE DURANT L'IMMERSION D'UN CABLE

Lorsque le lovage dans la cuve est terminé, on fait passer le bout des 50 mètres réservés de câble dans les parties renflées de tous les cercles et on peut l'épisser sur le bout supérieur du câble d'une cuve voisine. Mais cette dernière opération ne s'effectue généralement que pendant le déroulement du câble de la première cuve. Lorsqu'on arrive à l'avant-dernière couche, ce que les pièces de toile que l'on a eu la précaution de placer sur cette couche font connaître facilement, on ralentit la vitesse du navire, et on soulage les freins pour que le câble prenne du mou. Lorsqu'il ne reste plus dans la cuve qu'une seule couche de câble à dérouler, on fait stopper le navire qui perd son erre pendant le déroulement de la plus grande partie de cette couche et on continue à laisser filer du câble pour diminuer le plus possible sa tension. Arrivé aux quatre ou cinq derniers grands tours, on laisse tomber les freins à bloc pour arrêter complètement le déroulement, en faisant faire machine en arrière au navire, dans le cas où il ne serait pas encore parfaitement immobile. Dès que l'immobilité complète est obtenue, on bosse le câble à l'arrière du navire, on ouvre les parties saillantes des cercles pour en faire sortir le câble que l'on ramène dans la cuve contenant le nouveau câble à dérouler, et on l'y love avec les quatre ou cinq tours restant dans le fond de la première cuve. Lorsque le double du câble se présente, on ouvre la bague qui sert de guide, dans le haut de la cuve, et deux ou trois hommes en font sortir le câble avec précaution pour ne pas l'endommager. Le pont du navire est fendu ordinairement sur une lon-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gueur de 1 mètre du côté où s'ouvre la bague, pour que l'on puisse en tirer le double du câble sans le plier à trop petit rayon. Il est essentiel, dans cette opération, d'éviter avec le plus grand soin la formation des coques : des hommes très exercés doivent seuls en être chargés. Dès que tout le câble est lové dans la seconde cuve, le déroulement peut en être repris. Toutefois, la mise à l'eau de l'épissure exige des précautions spéciales : les freins sont desserrés d'abord de manière à laisser le câble filer à la mer à sa demande ; on remet ensuite le navire en marche, très doucement d'abord, en laissant toujours filer le câble ; on augmente la vitesse du navire progressivement jusqu'à ce qu'il ait repris sa marche normale.

Un changement de cuve exige toujours le sacrifice d'au moins deux milles de câble dans les très grands fonds et on ne doit pas hésiter à le faire pour arriver à poser l'épissure sur le fond avec aussi peu de tension que possible.

CALCUL DE LA LONGUEUR DE CABLE LOVÉ DANS UNE CUVE

La longueur de câble que peut contenir une cuve à section circulaire se calcule par la formule suivante :

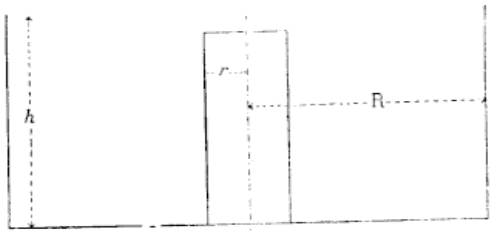


Fig. 145.

Soit R (fig. 145) le rayon de la cuve, h sa hauteur, r le rayon moyen du cône, d le diamètre du câble.

Le nombre de tours de câble contenus dans une couche sera

$$\frac{R - r}{d}$$

La longueur du premier tour de câble sera

$$2\pi\left(r + \frac{d}{2}\right)$$

celle du dernier

$$2\pi\left(R - \frac{d}{2}\right)$$

et par conséquent celle d'une couche

$$\pi (R + r)\left(\frac{R - r}{d}\right) = \frac{\pi}{d}(R^2 - r^2)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La cuve contenant environ $\frac{h}{d}$ couches, la longueur totale du câble sera approximativement

$$\frac{\pi}{d^2}\frac{h}{d}(R^2 - r^2)$$

Les couches de câble pouvant rentrer un peu les unes dans les autres, le nombre des couches, au lieu d'être $\frac{h}{d}$, est plus grand de 8 p. 100 environ ; d'un autre côté, l'épaisseur des retours du câble diminue le nombre des couches dans la même proportion à peu près. Il suffit donc d'ajouter à la longueur ci-dessus celle de ces retours eux-mêmes $\frac{h}{d}(R - r)$, ce qui donne pour la longueur totale du câble

$$\frac{h}{d}(R - r)\left(1 + \frac{\pi(R + r)}{d}\right)$$

§ 3. — MACHINE DE POSE

Le câble devant prendre une position horizontale en arrivant sur le pont, on y place une roue à gorge dont la tangente verticale est dans le prolongement de l'axe de la cuve et dont le plan est orienté dans la direction de la machine de pose. Comme le câble n'embrasse que le quart de la circonférence de cette roue, on la remplace quelquefois par des quadrants fixes, pièces en fonte représentant le quart d'une poulie à gorge de très grand diamètre, qui sont établies à demeure et sur lesquelles le câble glisse à frottement.

Le câble, guidé par des dalles en bois ou en fer aux changements de direction desquelles se trouvent, soit des poulies à gorge, soit de simples rouleaux, arrive ensuite à la machine de pose proprement dite, qui comprend comme parties essentielles les appareils de retenue, le tambour, le frein, le dynamomètre et la roue d'immersion.

APPAREILS DE RETENUE

Six roues, surmontées de poulies jockeys et munies chacune d'un frein, avaient été installées à bord du *Great-Eastern*, pour servir d'appareils de retenue, de manière à faire arriver le câble tendu sur le tambour. Mais comme, par leur force vive, elles déterminaient, au moment du serrage à bloc des freins, la continuation du déroulement du câble, lequel glissait alors sur le tambour, on ne tarda pas à les réduire à deux seulement et on allégea autant que possible toute cette partie de la machinerie. Les inconvénients

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que nous venons de signaler ne furent cependant qu'atténués. On remarqua, en outre, qu'au moment où le déroulement recommençait, les roues de ces appareils ne se mettant pas en mouvement en même temps que le tambour, le câble était soumis, entre ces deux points, à des tractions brusques qui, par de très grandes profondeurs, pouvaient en faire craindre la rupture. Dans les pays chauds, enfin, la composition bitumineuse qui forme l'enveloppe extérieure des câbles, ramollie sous l'action de la chaleur, se collait entre les roues et leurs jockeys et finissait bientôt par en rendre le mouvement impossible. On arriva ainsi en peu d'années à supprimer entièrement ces machines à bord de tous les navires qui en étaient pourvus.

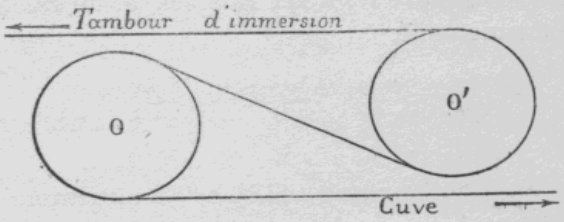


FIG. 146.

Sur le *Faraday,* on dut, pendant l'immersion du câble atlantique de 1879,

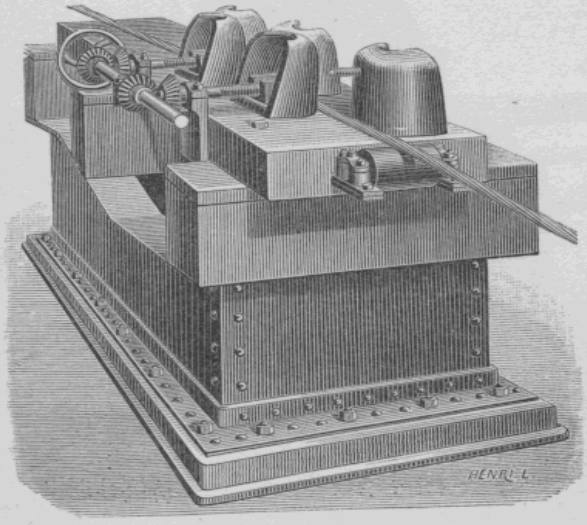


FIG. 147.

caler les deux roues O et O′ et on obtint une certaine retenue du câble en avant du tambour, en les lui faisant contourner en forme de 8 renversé, ainsi que l'indique la figure 146.

En 1871, sir Ch. Bright remplaça ces appareils, à bord de la *Dacia*, navire de 1856 tonneaux, appartenant à l'*India Rubber, Gutta percha and Telegraph Works C°*, par une double rangée de pièces semi-circulaires en fonte, placées sur un bâti très solide. L'une des rangées (fig. 147) est fixe ; les pièces de l'autre sont disposées de façon à ce que chacune d'elles soit en regard

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de l'espace libre entre deux pièces de la première rangée; elles peuvent, en outre, être déplacées à l'aide d'un volant agissant sur des engrenages. L'intervalle compris entre les deux rangées peut ainsi être augmenté ou diminué à volonté, d'où résulte une déformation plus ou moins grande du câble glissant entre les deux rangées, et un ralentissement correspondant dans son déroulement.

TAMBOUR

Le tambour (fig. 148) est une grande roue d'environ 2 mètres de diamètre, à gorge plate de 40 centimètres de largeur environ, munie de deux

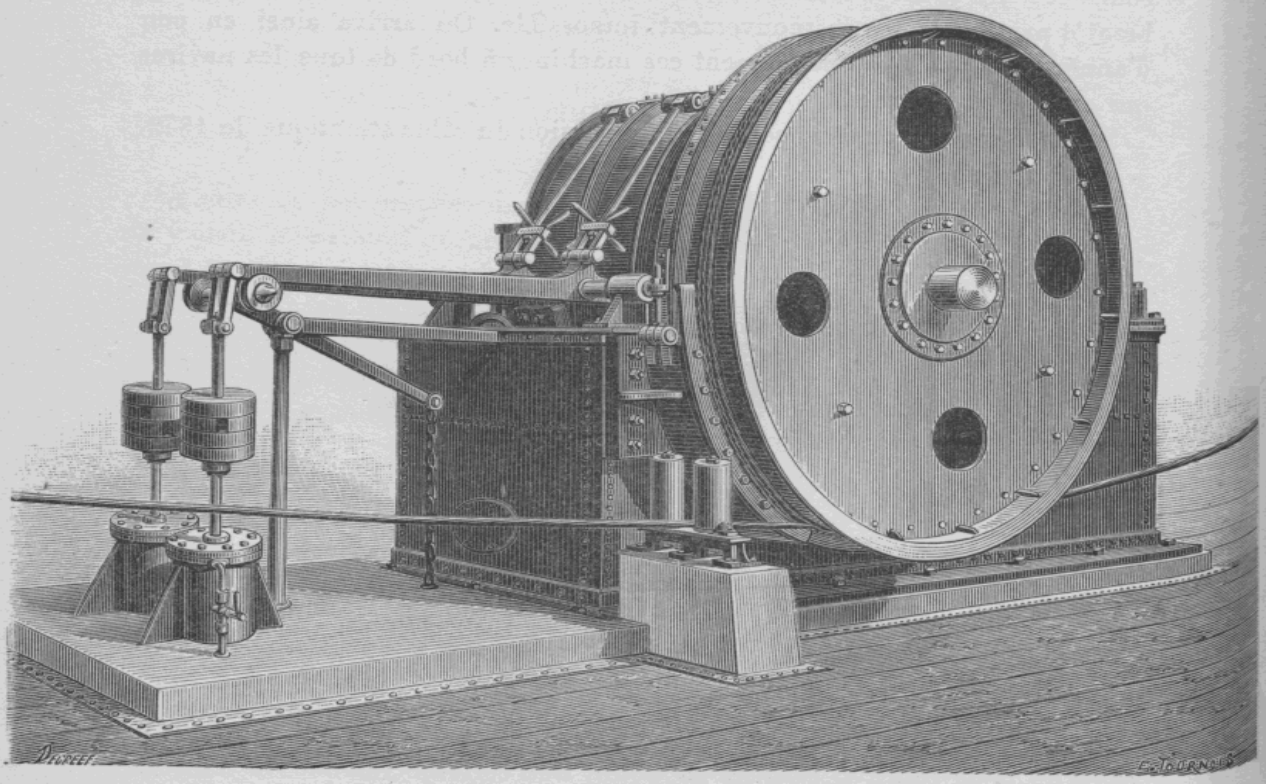


FIG. 148

rebords faisant saillie de 6 ou 8 centimètres. Cette roue, qui doit être construite en tôle très légère, pour en diminuer le plus possible la masse et, par suite, la force vive qui reste toujours néanmoins considérable en raison de la rapidité de sa rotation, est montée en porte à faux à l'extrémité d'un axe très solide.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le câble s'enroule ordinairement trois ou quatre fois sur le tambour : les brins d'arrivée et de départ ne sont pas, par suite, dans un même plan et leur distance varie avec le diamètre du câble. Pour donner à chaque brin la direction qui lui convient et l'empêcher de chevaucher sur les voisins, on fait passer le câble de chaque côté du tambour, soit sur une roue à gorge dont on peut régler la position sur son axe, soit entre deux rouleaux verticaux qui peuvent se déplacer légèrement dans une direction perpendiculaire à la ligne du câble et être calés au point jugé convenable.

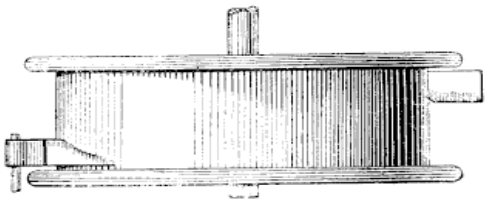


Fig. 149.

Contre la jante du tambour (fig. 149), aux points d'arrivée et de départ du câble, peuvent s'appliquer des pièces en acier très dur, recourbées suivant un arc de la circonférence du tambour, qu'on appelle *couteaux*. Ces couteaux, amincis à leur extrémité, sont l'un, celui qui se trouve du côté des appareils de retenue, fixe ; l'autre, celui qui se trouve du côté du dynamomètre, mobile. A cet effet, ce dernier AB (fig. 150) est porté par un levier CD mobile autour d'un axe D ; une vis E que l'on manœuvre par le volant F permet de le rapprocher ou de l'écarter à volonté de la jante du tambour.

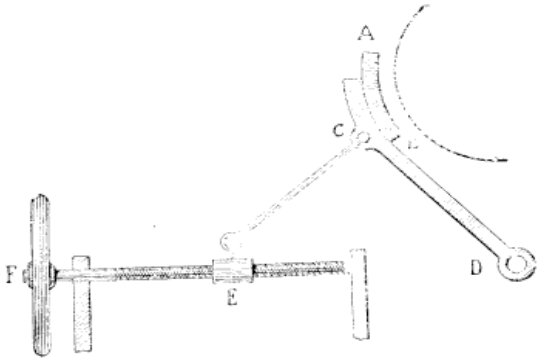


Fig. 150.

Le couteau d'avant est appliqué contre le rebord du tambour le plus voisin du brin de câble arrivant de la cuve, et le couteau d'arrière contre le rebord diagonalement opposé. Le premier est destiné à repousser successivement, pendant l'immersion, les tours de câble déjà enroulés sur le tambour, de manière à faire place au brin qui arrive pour s'enrouler à son tour. Le second est appelé à faire le même office en cas de relèvement du câble par la machine de pose : c'est pour ce motif qu'on l'a rendu mobile. Le couteau d'avant ne sert pas à ce moment ; mais les relevages ne se faisant qu'exceptionnellement avec les machines de pose, on peut se dispenser de la complication qu'entraînerait la possibilité de déplacer ce couteau.

Pendant la pose, les couteaux, bien que trempés aussi fortement que possible, s'usent très rapidement. On profite ordinairement de l'arrêt que nécessite un changement de cuve pour remplacer ces pièces. Quelquefois, le couteau comprend une partie antérieure amovible qui seule doit être

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

changée ; on a alors des plaques de rechange toutes prêtes et tout est disposé pour que l'opération puisse se faire le plus promptement possible.

Un compteur du nombre de tours faits par le tambour est monté sur son axe. Pour en déduire la longueur de câble posé, on ajoute la circonférence du câble à celle du tambour et on prépare à l'avance une table de correspondance des nombres de révolution du tambour aux longueurs de câble déroulées.

Un petit marteau frappe un coup sur un timbre à chaque révolution du tambour. Avec une montre à secondes, on peut donc facilement déterminer la vitesse de déroulement du câble.

FREINS

Les freins, construits d'après le principe d'Appold, se composent généralement de deux tambours d'un diamètre un peu inférieur à celui du tambour de pose, montés sur le même arbre que ce dernier et exactement semblables entre eux. Chacun d'eux est embrassé par une série de sabots en bois, au

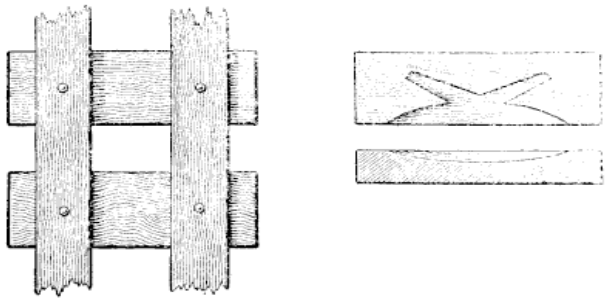


Fig. 151.

nombre d'une trentaine, fixés à deux lames d'acier minces et très flexibles, à des intervalles angulaires tels que, lorsque ces lames sont serrées contre le tambour, les parties radiales des sabots arrivent presque au contact les unes des autres. Les sabots sont taillés de manière à frotter contre le tambour dans le sens parallèle aux fibres du bois ; ils sont échancrés (fig. 151) de façon à retenir un peu d'eau qui en lubrifie légèrement la face inférieure frottante et en empêche le grippement. Pour éviter l'échauffement de ces bois qui arriveraient à prendre feu lorsque le déroulement du câble est rapide, la moitié inférieure des tambours plonge dans une caisse qui est remplie d'eau froide constamment renouvelée.

Les deux extrémités de chaque paire de lames d'acier forment deux char-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nières très solides (fig. 152), à l'intérieur de chacune desquelles peut tourner un axe. Les deux axes sont disposés de part et d'autre d'un grand levier horizontal AD mobile autour du point fixe O. L'axe inférieur A fait corps avec le bras de levier OA même; l'axe supérieur porte en son milieu une tige B filetée intérieurement, dans laquelle on engage l'une des extrémités d'une double vis à filets de sens contraire; l'autre extrémité de cette vis est reliée à une pièce en fer C articulée en F sur le bras de levier OD. En pesant sur l'extrémité D du levier AD, on rapproche l'un de l'autre les deux bouts A et B des lames d'acier qui serrent ainsi les sabots en bois contre le tambour. Le frottement est proportionnel à la pression que ces sabots exercent et détermine le ralentissement ou même l'arrêt complet des roues et par suite celui du tambour de pose. Le déroulement du câble se trouve donc arrêté, s'il ne peut glisser sur le tambour. On règle à l'avance la tension des bandes d'acier, à l'aide de volants E montés sur les vis.

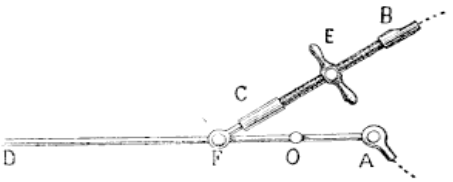


Fig. 152.

Les deux tambours sont parfois confondus en un seul, sur lequel frottent les deux rangées de sabots, de manière à diminuer la masse de la machine.

L'action de la puissance, à l'extrémité D du levier AD, s'exerce de deux manières différentes :

1° On articule en D (fig. 153), par l'intermédiaire d'une petite manivelle, l'extrémité d'une tige que l'on peut charger de poids, et dont l'autre extrémité porte un piston qui plonge dans un cylindre rempli d'eau : les deux fonds du cylindre sont mis en communication par un tube à petite section qui permet le passage lent d'une faible quantité d'eau de l'une des parties du corps de pompe à l'autre. Le choc que produiraient les poids en retombant brusquement se trouve ainsi considérablement amorti.

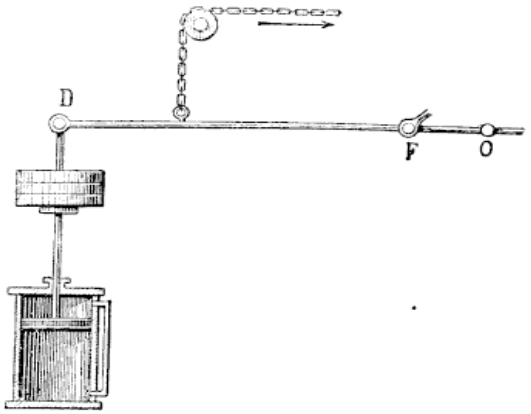


Fig. 153.

Vers l'extrémité D du levier est attachée une chaîne ou une corde métallique qui s'enroule sur des poulies de renvoi et aboutit à un treuil placé près du dynamomètre et sur l'axe duquel est montée une roue de gouvernail. L'homme préposé à ce service manœuvre cette roue dans un sens ou dans l'autre et par suite serre ou desserre les freins, suivant la tension

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du câble dont il suit toutes les variations à l'échelle du dynamomètre.

2° Les extrémités de chacun des deux leviers A D (fig. 154) sont liées, en un point D que l'on peut déplacer à volonté, par une traverse horizontale.

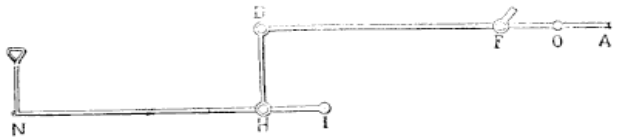


Fig. 154.

Au milieu de cette traverse est articulé un levier vertical D H dont l'extrémité H est elle-même articulée sur un levier horizontal N H, mobile autour d'un point fixe I. Un homme pèse sur l'extrémité N du levier N H, que l'on charge en outre de poids. On peut ainsi, bien mieux que dans le premier système, graduer la pression que l'on exerce sur le frein, surtout lorsqu'on

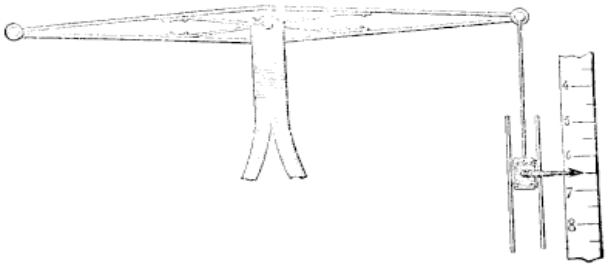


Fig. 155.

la diminue. La puissance s'exerçant en outre par l'intermédiaire de deux bras de levier, peut facilement être centuplée, si le rapport des bras des deux leviers est convenablement choisi; une force de 100 kilogrammes agissant au point N peut donc développer une force de 10 tonnes au point A.

L'homme chargé de la manœuvre des freins ne pouvant dans ces conditions être placé près du dynamomètre, dont il doit suivre cependant tous les mouvements, un grand balancier horizontal (fig. 155), en fer très léger, est mobile autour d'un point fixe placé à mi-distance entre l'axe de la roue du dynamomètre et la position de l'homme aux freins. L'une des extrémités du balancier est articulée sur l'axe du dynamomètre et participe ainsi à son mouvement; l'autre porte un petit équipage mobile le long d'une règle graduée en sens inverse de l'échelle du dynamomètre dont toutes les indications se trouvent ainsi exactement reproduites.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DYNAMOMÈTRE

Le dynamomètre (fig. 156) est encore semblable à celui du *Great-Eastern* que avons déjà décrit précédemment et n'en diffère que par la légèreté de sa construction.

De chaque côté de la roue du dynamomètre, dans le même plan vertical, à la même hauteur et à la même distance horizontale, A B = B D (fig. 157), se trouvent deux poulies à gorge A et D. Le câble passe sur ces deux poulies et sous celle du dynamomètre dont le poids le fait fléchir d'autant plus que sa tension est plus faible. On prépare à l'avance des règles graduées indiquant, pour diverses charges de l'équipage mobile, la tension du câble, d'après la position occupée par l'aiguille le long de la règle. On peut graduer ces règles expérimentalement, en chargeant de poids variés et connus un plateau relié à l'extrémité d'une corde que l'on fait passer sous le dynamomètre, ou en calculant, d'après des considérations géométriques très simples, la position que doit occuper l'axe de la roue du dynamomètre pour des tensions données du câble : dans ce dernier cas, toutefois, le frottement de l'appareil contre ses montants doit être assez doux pour pouvoir être négligé.

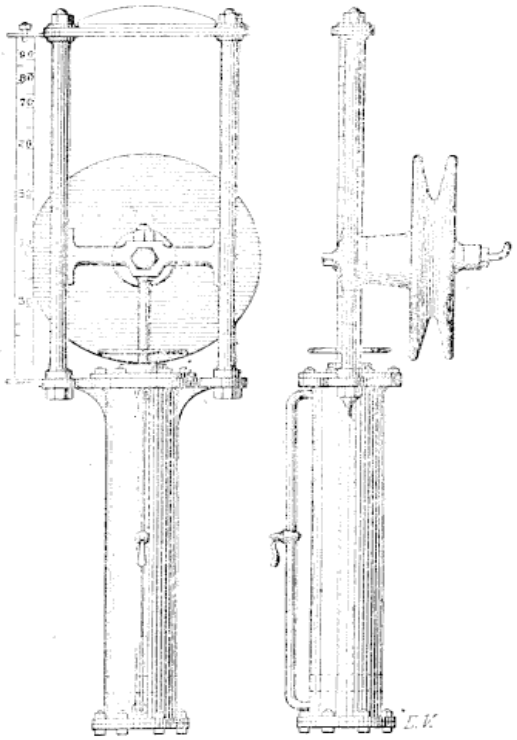


Fig. 156.

Soient, effet

C H = P le poids en kilogrammes de l'équipage mobile du dynamomètre,

C E = C F = T la tension du câble,

B C la hauteur dont le poids P a fait fléchir le câble entre les roues A et D.

Le poids P devant être équilibré par la somme des deux composantes verticales C I des tensions C E et C F, égales et contraires du câble, au point C, on aura

$$P = 2\,C\,I$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'un autre côté, les triangles semblables C I E et C B A donnent

$$\frac{C\,I}{C\,B} = \frac{T}{A\,C}$$

et

$$A\,C = \sqrt{A\,B^2 + B\,C^2}$$

On tire de ces trois relations

$$B\,C = A\,B\,\frac{P}{\sqrt{4\,T^2 - P^2}}$$

Pour une charge déterminée P, il suffit de faire varier la tension T pour conclure de cette relation les valeurs correspondantes de la flexion B C.

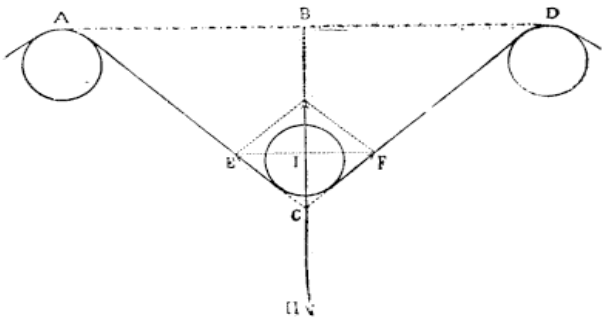


Fig. 157.

Inversement, on peut en conclure la tension T pour une flexion déterminée du câble

$$T = \frac{P\,\sqrt{A\,B^2 + B\,C^2}}{2\,B\,C}$$

On voit que ces deux quantités sont sensiblement inverses l'une de l'autre, de telle sorte que l'on peut prolonger la graduation d'après cette considération, après avoir obtenu les premières marques, sans faire usage chaque fois des formules que nous venons d'établir.

Exceptionnellement, les deux poulies à gorge A et D peuvent ne pas se trouver à la même hauteur, de même que la verticale parcourue par le centre de la roue du dynamomètre peut ne pas être également distante des deux poulies fixes[1]. Les tensions opposées T et T' du câble (fig. 158) restent égales, mais leurs composantes horizontales ont alors une résultante t qui représente la pression exercée par la roue mobile contre l'un de ses guides latéraux. Cette roue étant en équilibre sous l'action du poids p de l'équipage

[1] M. Em. Lacoine. *Engineering*. 1885, vol. XXXIX, p. 174.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mobile, des deux tensions T et T' et de la réaction — t du guide, si l'on pro-

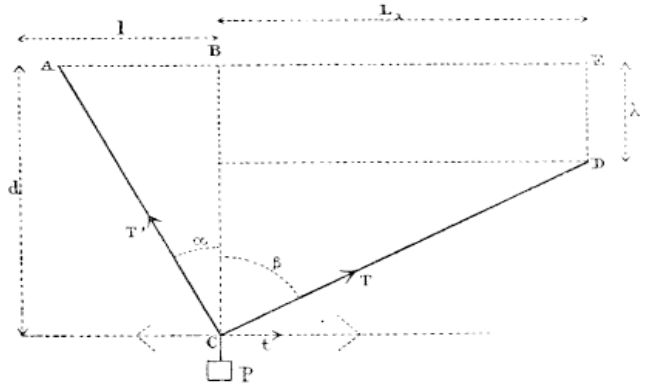


FIG. 158.

jette ces forces sur deux axes, l'un vertical, l'autre horizontal, on obtient les relations

$$T' \cos \alpha + T \cos \beta - p = 0$$
$$T \sin \beta - T' \sin \alpha - t = 0.$$

D'ailleurs

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{d}, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{l_1}{d - \lambda} \quad \text{et} \quad T = T'$$

On tire de là

$$T = \frac{p}{\frac{d}{\sqrt{d^2 + l^2}} + \frac{d - \lambda}{\sqrt{(d - \lambda)^2 + l_1^2}}}$$

et

$$t = T \left(\frac{l_1}{\sqrt{(d - \lambda)^2 + l_1^2}} - \frac{l}{\sqrt{d^2 + l^2}} \right)$$

Dans le cas particulier où les deux poulies A et D sont à la même hauteur, sans que la verticale C B parcourue par la roue mobile tombe au milieu de la droite A D, on a $\lambda = 0$ et il vient

$$T = \frac{p}{\frac{d}{\sqrt{d^2 + l^2}} + \frac{d}{\sqrt{d^2 + l_1^2}}}$$

Si l'on fait en outre $l = l_1$, on retrouve la formule donnée plus haut $T = \frac{p\sqrt{d^2 + l^2}}{2d}$ et la pression latérale $t = o$.

Il convient de remarquer que ces dynamomètres donnent exactement la tension *statique* du câble, c'est-à-dire sa tension lorsqu'il est au repos, mais qu'ils ne tiennent pas compte de sa vitesse soit au déroulement, soit au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

relevage, et ne donnent par suite que des *indications approximatives* de la vraie tension du câble. Ils ne sont justes que pour la tension des cordages de dragues, durant les opérations de dragages.

Un véritable dynamomètre devrait indiquer le nombre de kilogrammes que le câble peut soulever par seconde à une hauteur verticale d'un mètre : mais la solution de ce problème reste encore à trouver.

Appareil enregistreur des tensions.

La connaissance de toutes les variations de la tension d'un câble, durant son immersion ou son relevage, ou même d'un cordage de dragues, étant très utile, on a mis à l'essai des appareils enregistrant automatiquement la valeur de cette tension, à chaque instant, sur une feuille de papier qui se déroule d'un mouvement uniforme. Une cordelette métallique très fine, dont

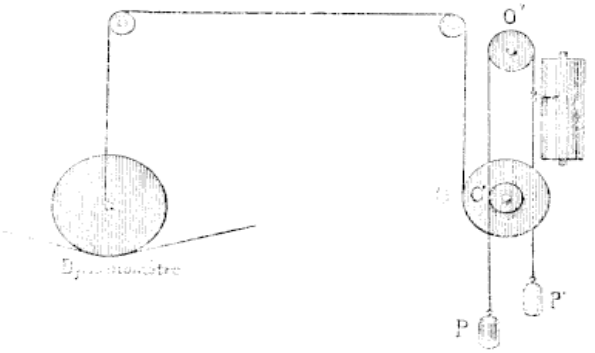


Fig. 159.

l'une des extrémités est attachée à l'axe de la roue du dynamomètre, est soutenue par des poulies de renvoi convenablement disposées, et s'enroule sur une poulie O (fig. 159) dont la jante porte une rainure hélicoïdale : sa seconde extrémité est fixée à la poulie O. La cordelette se trouve toujours tendue par un poids P suspendu à un fil d'acier qui s'enroule sur une seconde poulie O' de diamètre beaucoup plus faible que la première O, mais calée sur le même axe que celle-ci. Le fil passe ensuite sur une poulie de renvoi O'' placée au-dessus de la poulie O et porte de l'autre côté un contre-poids P' égal à P.

Le mouvement à la circonférence de la poulie O est égal au mouvement rectiligne de l'axe de la roue du dynamomètre : celui de la roue O' et par suite le mouvement rectiligne du fil d'acier est réduit dans le rapport des diamètres des poulies O et O'. Si donc ce fil porte en un de ses points un stylet et qu'une bande de papier mue par un mouvement d'horlogerie se déroule devant lui d'un mouvement uniforme, le stylet tracera sur la bande une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courbe dont les abscisses représenteront les temps, et les ordonnées les tensions, à une échelle représentée par le rapport des diamètres des poulies O et O'.

MACHINE A VAPEUR

Il est utile, lorsqu'une faute se déclare durant l'immersion et qu'elle n'est pas éloignée du navire, de pouvoir relever cette section de câble avec la machine de pose même : on évite ainsi de couper le câble et de transporter le bout de la partie immergée de l'arrière à l'avant pour le ramener ensuite de l'avant à l'arrière, double opération toujours dangereuse dans les grandes profondeurs.

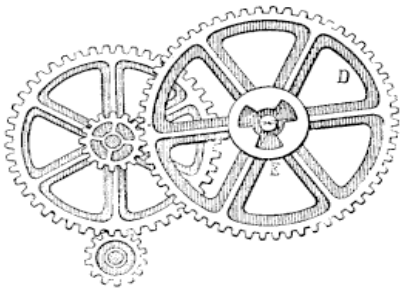


FIG. 160.

Une ou deux machines à vapeur, suivant la force dont on veut pouvoir disposer, chacune à deux cylindres, et dont les points morts sont croisés, transmettent le mouvement à une roue D (fig. 160) qui est folle sur l'arbre du tambour de pose : en introduisant, à l'aide d'une vis sans fin, dans une cavité de forme convenable de cet arbre, une pièce E liée déjà à l'axe de la roue D, les deux axes deviennent solidaires. Il suffit de mettre en place le couteau mobile de l'arrière du tambour de pose pour pouvoir procéder au relevage du câble.

ROUE D'IMMERSION

La roue d'immersion est une roue à gorge, formant un V assez ouvert, mobile entre deux joues bien arrondies et qui en affleurent les bords très exactement, afin que le câble ne puisse porter sur les arêtes vives de la roue, lorsque, par une circonstance quelconque, la partie déjà immergée n'a pas une direction parallèle à l'axe du navire. Au-dessus de la roue d'immersion se trouve un couvercle mobile, destiné à empêcher le câble de décapeler de la roue, durant les grands mouvements de tangage. Tout cet ensemble est monté sur une plate-forme solidement liée à la membrure du bâtiment et qui en surplombe l'arrière.

A cette plate-forme sont fixés, de distance en distance, de gros anneaux en fer portant de doubles cordes de chanvre que l'on tourne autour du câble à la manière d'une tresse pour l'empêcher de glisser, en cas d'arrêt : on donne à ces cordes le nom de *bosses*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a quelquefois cherché à garantir l'hélice du navire à l'aide d'une grande cage métallique qui empêchait le câble ou les cordages de dragues et de bouées de s'enrouler autour de l'axe de l'hélice; mais on y a renoncé,

FIG. 161.

les inconvénients qui résultaient de son emploi étant plus nombreux que les avantages qu'on en pouvait retirer.

A bord du *Faraday*, les joues de la roue d'immersion sont supprimées et celle-ci se trouve en dessous de la plate-forme qui est fixée à l'extrémité du gaillard d'arrière, directement au-dessus de la mer par conséquent. Son axe est soutenu par des tirants en fer liés à un cadre horizontal qui est mobile autour d'un axe parallèle à l'axe du bâtiment (fig. 161). Le câble, en appuyant contre l'un ou l'autre bord de la gorge de la roue, fait tourner celle-ci autour de son axe et la roue vient ainsi se placer d'elle-même dans le plan déterminé par les directions des deux parties du câble, à bord et à la mer, en évitant tout frottement nuisible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sur ce même navire, une disposition spéciale a été prise pour diminuer l'effet du tangage sur le câble, dont la véritable tension, par suite des oscillations considérables du dynamomètre, ne peut plus être connue dans les gros temps. Cette disposition consiste à répartir l'action du tangage sur une longueur de câble supplémentaire égale au double de la longueur du pont, au lieu de ne la faire porter que sur la section comprise entre le tambour et la roue d'immersion. A cet effet, le câble fait quatre tours et demi sur le tambour de pose qu'il quitte par le haut en se dirigeant vers l'avant du navire, soutenu par des dalles en bois ; de distance en distance, il passe sur une poulie à gorge contre laquelle il est serré par une pièce de bois appuyée contre le bâti de la poulie et lestée à son extrémité libre par des poids. A l'avant, il s'enroule sur une grande roue à gorge, de 2 mètres de diamètre, en tôle très légère, dont il embrasse une demi-circonférence; il revient ensuite vers l'arrière, passe successivement sous deux dynamomètres dont le second, le plus voisin de la roue d'immersion, sert seul à régler la pose et enfin tombe de la roue d'immersion à la mer.

§ 4. — MACHINE DE RELÈVEMENT

La machine de relèvement se compose d'une machine à vapeur horizontale, à deux cylindres, très puissante, alimentée autant que possible par un ou deux générateurs de vapeur distincts de ceux qui fournissent la vapeur aux machines motrices du navire. Cette machine (fig. 162) transmet le mouvement à un grand tambour tout à fait semblable au tambour de pose, et muni à l'avant et à l'arrière de deux couteaux mobiles. La transmission de mouvement de la machine au tambour se fait ordinairement à l'aide de deux paires d'engrenages : l'une d'elles permet de développer une très grande force avec une faible vitesse, la seconde d'accélérer la vitesse du tambour avec une force moindre. On se sert de l'une ou l'autre paire suivant les besoins.

Sur l'axe du tambour est monté un frein, construit toujours d'après le principe d'Appold, mais de dimension réduite et manœuvré à l'aide d'une vis que l'on tourne avec un volant (fig. 163). La machine de relèvement peut ainsi servir à l'occasion de machine de pose, comme cette dernière est employée dans certaines circonstances au relevage : cette faculté est très précieuse, soit en cas de réparation, soit en cas d'immersion d'un câble dont l'extrémité doit être raccordée avec un atterrissement posé à l'avance. On évite alors les transports de câble de l'avant à l'arrière du navire.

Lorsque l'on pose par l'avant, la machine à vapeur est débrayée et aucune

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des deux transmissions de mouvement ne fonctionne. S'il en était autrement, on se verrait obligé de régler la vitesse du navire sur celle de la machine de relèvement qui est toujours faible et ne dépasse pas généralement

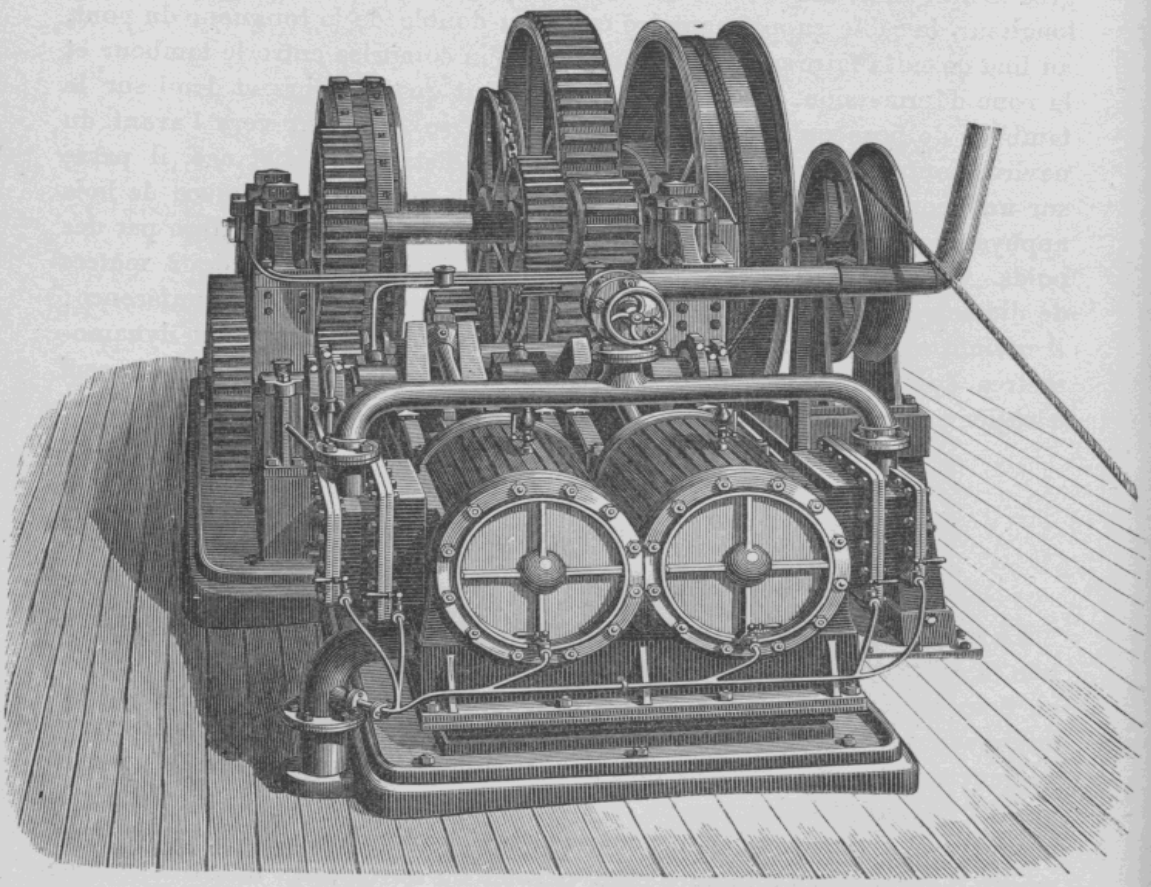


Fig. 162.

3 nœuds à l'heure ; le bâtiment marchant à une allure aussi modérée gouvernerait mal, et il en résulterait une perte inutile de câble.

En arrière du tambour (fig. 164) se trouve une poulie à gorge, surmontée d'une poulie jockey et susceptible d'être déplacée légèrement le long de l'arbre qui la supporte, de manière à pouvoir être mise toujours en regard du brin de câble qui sort du tambour pour se rendre dans la cuve. L'axe de cette poulie reçoit sa commande de l'arbre du tambour à l'aide d'une chaîne plate en fer ou d'une chaîne en bois articulée à la Vaucanson, dont les anneaux s'incrustent dans les gorges des deux poulies. Les diamètres de ces poulies sont tels que la vitesse du câble à la circonférence de la poulie d'entraînement dépasse légèrement celle sur le tambour : le câble se trouve ainsi

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tendu entre le tambour et la poulie et entraîné par cette dernière. Des hommes le soutiennent ensuite jusqu'à son entrée dans une cuve.

En avant du tambour, entre deux roues à gorge, égales et disposées symétriquement de chaque côté, est placé un dynamomètre semblable à celui de l'arrière, mais plus robuste. Quelquefois, le bord supérieur de la première roue se trouve au niveau de celui du tambour qui remplace ainsi la seconde roue.

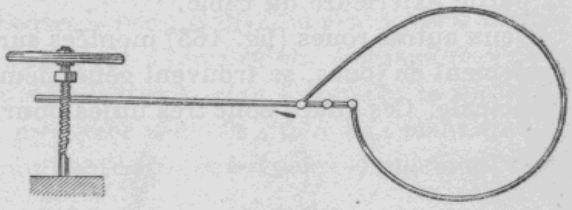


Fig. 163.

Le câble passe ensuite dans une roue à gorge, qui est installée à l'extrémité de deux fortes poutres en fer solidement fixées à l'étrave du navire en

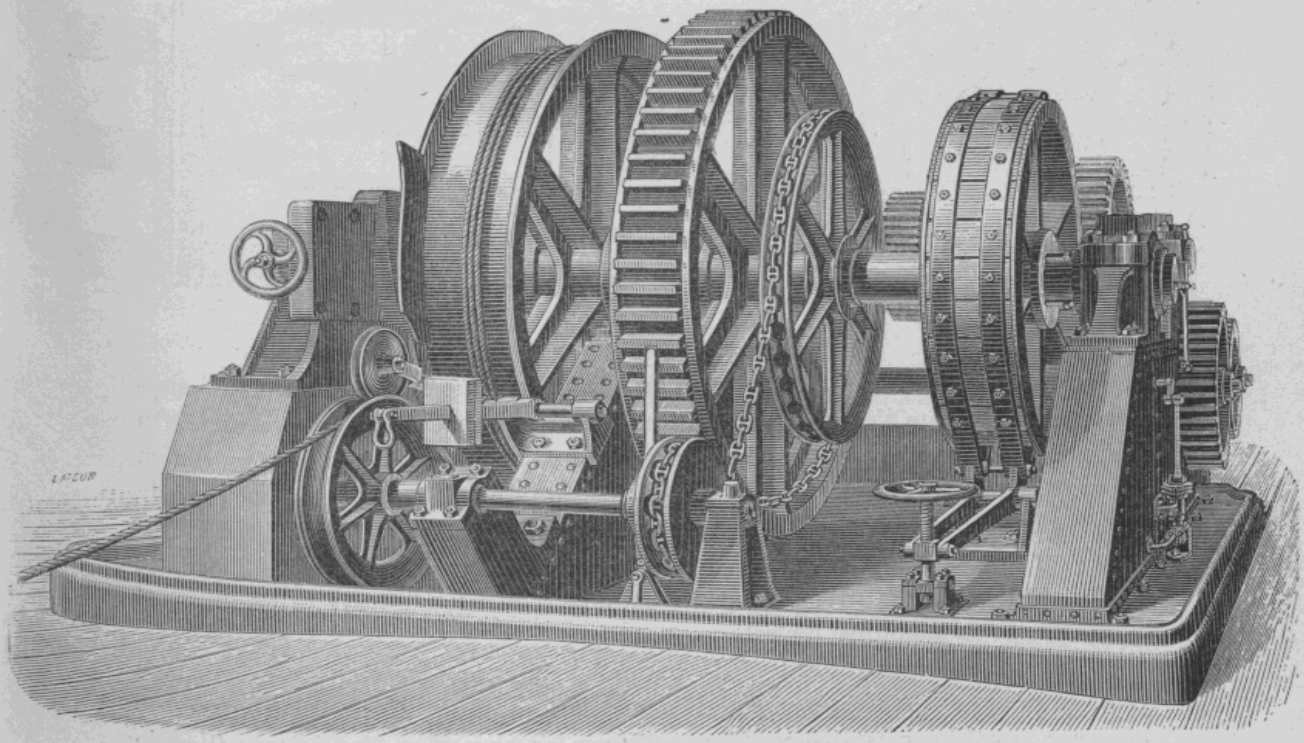


Fig. 164.

avant duquel elles font largement saillie ; ces poutres portent de distance en distance de gros anneaux en fer dans lesquels on passe des bosses, comme à l'arrière, et sont recouvertes d'un plancher mobile formant plate-forme. Le câble, en sortant de là, se rend à la mer. Cette roue, comme celle d'immersion, est bordée extérieurement de deux joues très évasées, bien arrondies

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et parfaitement ajustées, pour que le câble ne puisse porter sur une arête vive, dans le cas où l'axe du navire ne se trouverait pas dans la direction de la partie extérieure du câble.

Deux autres roues (fig. 165) montées sur des axes indépendants et bordées également de joues, se trouvent généralement une de chaque côté de la roue principale. Ces roues sont très utiles pour relever, par exemple, un cordage

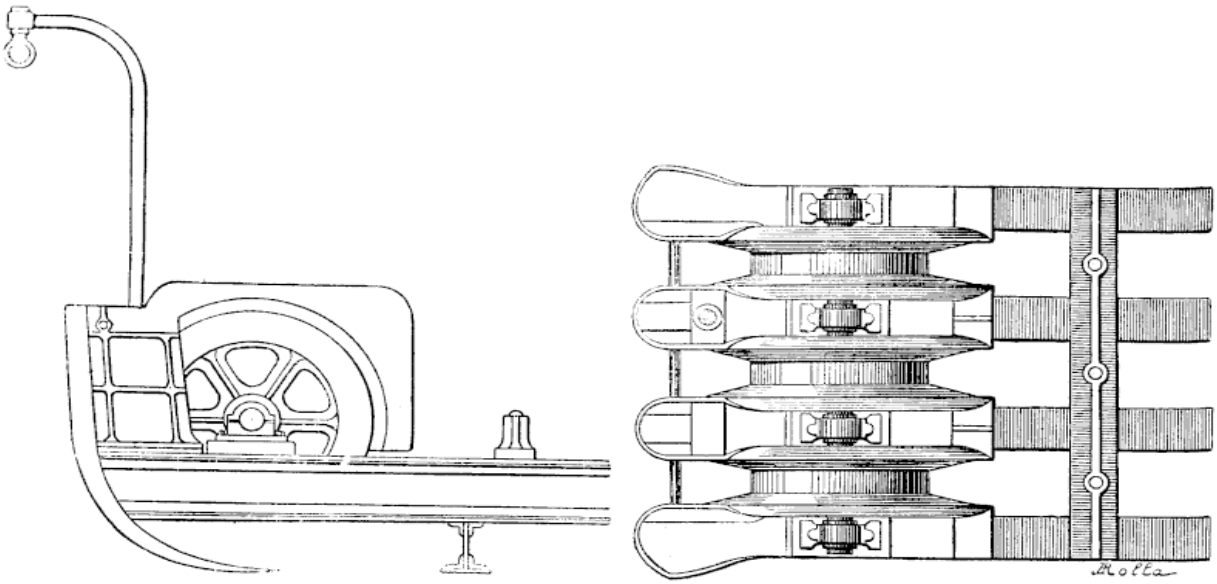


Fig. 165.

de bouée qui est relié à l'extrémité du câble, lorsque la roue principale supporte le câble que l'on vient d'immerger pour le raccorder au premier. On fait passer le cordage de bouée sur l'une ou l'autre des deux petites roues, suivant que la direction des vents et des courants fait accoster le navire à la bouée par tribord ou par bâbord. On relève ensuite le cordage à l'aide d'un treuil ou cabestan quelconque, à moins que l'on ne préfère bosser le câble aux anneaux fixés sur la plate-forme du gaillard d'avant, dégarnir le tambour et se servir de la machine de relèvement.

Le navire se trouvant obligé de s'avancer dans la direction de ce cordage pour le relever à peu près à pic, il devient nécessaire, de temps à autre, de *choquer* le câble, c'est-à-dire d'en soulager les bosses et d'en laisser filer de petites quantités à la mer, pour diminuer sa tension. Toutes ces opérations seraient beaucoup simplifiées et rendues en même temps plus aisées et plus sûres, si la machine de relèvement comportait deux tambours indépendants pouvant chacun être actionné à volonté par la machine à vapeur, de telle sorte qu'il fût possible de relever sur l'un des tambours pendant que l'on immergerait par l'autre. Ce perfectionnement constitue, à nos yeux, l'un des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

desiderata les plus importants que comporte actuellement la construction des machines de relèvement.

A bord du *Faraday*, la roue de relèvement principale se trouve au-dessous de la plate-forme qui est fixée à l'extrémité du gaillard d'avant et est mobile autour d'un axe horizontal, comme la roue d'immersion, de manière à pouvoir se placer toujours automatiquement dans le plan formé par la direction du câble venant de ou allant à la mer avec celle du câble déjà embarqué.

Les deux roues latérales sont, au contraire, enchâssées simplement dans le bâti de la plate-forme.

A l'extrémité de la plate-forme se trouve un porte-manteau en fer recourbé (fig. 165) muni d'une poulie sur la gorge de laquelle on enroule une corde. Cette corde sert à hisser les grappins, champignons, etc., à soutenir les étriers qui supportent les hommes, lorsqu'on dégage un câble de son grappin, etc.

PASSAGE D'UN CABLE DE L'ARRIÈRE A L'AVANT DU NAVIRE OU INVERSEMENT

Cette opération est nécessaire lorsque, durant une pose, il se déclare une faute, et que la machine de pose n'est pas pourvue d'une machine à vapeur pour le relevage du câble, ou que cette machine est insuffisante. Elle est

Fig. 166.

encore indispensable, lorsque après avoir immergé le câble de grands fonds, on veut le relier au câble d'atterrissement qui a été posé à l'avance et dont le bout est raccordé à une bouée. L'opération inverse se fait lorsque après avoir relevé une partie de câble contenant une faute, on veut immerger la section neuve destinée à rétablir la communication, et que le frein de la machine de relèvement n'est pas assez puissant pour modérer ou arrêter le déroulement. Aussi, estimons-nous qu'une attention particulière doit être donnée à ce frein, lors de l'installation de la machine de relèvement sur un navire et que sa puissance doit être calculée en vue des plus grandes profondeurs dans lesquelles le navire peut être appelé à effectuer des opérations.

Le passage du câble d'une extrémité à l'autre du navire exige que le bout

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en soit libre ou que le câble soit coupé sur le pont. Un fort cordage (fig. 166) ou une chaîne en fer, est enroulé sur le tambour d'avant et passe dans la machinerie qui lui fait suite jusqu'au delà de la roue de relèvement ; on le ramène ensuite vers l'arrière par l'extérieur du navire, en le portant en dehors des haubans, des bouées et de tous les obstacles, quels qu'ils soient, qui font saillie sur la coque du bâtiment. On amarre solidement le cordage ou la chaîne sur le câble, près de la roue d'immersion ; on frappe d'autre part une bonne pièce de filin sur le câble, en arrière du tambour de pose. On coupe le câble et on choque le filin, soit à la main, soit à l'aide de la machine de pose, si elle comprend une machine à vapeur. Lorsque le second amarrage a dépassé la roue d'immersion, on commence à virer doucement la chaîne à la machine de relèvement ; enfin, lorsque la chaîne est suffisamment tendue et que l'on estime qu'elle se trouve sensiblement dans la direction du câble, on lâche en grand le filin et on hale le tout à bord, à l'avant.

Il faut avoir grand soin dans cette opération, durant laquelle le câble est pendu verticalement à l'arrière du navire et tiré ensuite vers l'avant, de ne pas engager le câble ou l'un des filins dans l'hélice du bâtiment : ce danger est surtout à redouter lorsque le navire comprend deux hélices, comme le *Faraday*. Au besoin, on écarte le câble ou le cordage de l'hélice, à l'aide d'une longue perche qu'un homme tient à la main. On voit par là, combien cette opération devient dangereuse, surtout par le mauvais temps, et combien il est avantageux d'avoir à bord une installation qui permette de l'éviter autant que possible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VII

ENGINS DIVERS

§ 1er. — Cordages pour bouées et pour dragues. — Maillons de jonction.
§ 2. — Chaines en fer.
§ 3. — Champignons.
§ 4. — Grappins divers ; — de M. A. Jamieson ; — de M. Lambert ; — de M. Kingsford.
§ 5. — Bouées. — Immersion d'une bouée — Relèvement d'une bouée.

§ 1er. — CORDAGES POUR BOUÉES ET POUR DRAGUES

Les cordages pour bouées et pour dragues ne diffèrent les uns des autres que par leur force. Ils se composent de fils d'acier de qualité supérieure, de 2,5 millimètres de diamètre, entourés chacun de cinq à sept cordelettes en chanvre de Manille, très légèrement goudronné (fig. 167) ; la résistance de chacun des fils ainsi composés est égale à la somme des résistances du fil d'acier et des cordelettes de chanvre qui le recouvrent. On corde ensemble d'abord plusieurs de ces fils et ensuite plusieurs cordages élémentaires ainsi composés. Le cordage dit 3 par 3, formé de trois torons comprenant chacun trois fils d'acier recouverts, n'est employé que comme filin de bouée ; il est assez léger, peut résister à une traction de 5 tonnes, mais a une grande tendance à former des coques, surtout lorsqu'il a été mouillé ; il est pour ce motif d'un usage très incommode. Le cordage de 4 par 4, composé de quatre torons de quatre fils chacun, est un très bon type à la fois pour bouées et pour dragues. Avec 440 grammes de chanvre, il pèse par mètre 1,080 kilogramme dans l'air, 0, 565 kilogramme

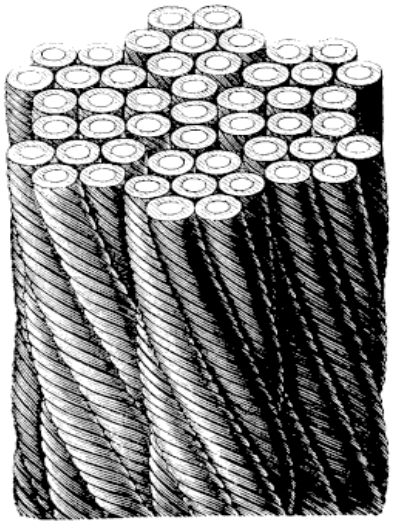


Fig. 167.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans l'eau et résiste à une traction effective de 9 tonnes, avec un allongement de 8 p. 100. Le cordage de 6 par 3 est également un excellent modèle.

Pour de plus grandes résistances, on emploie un cordage de 6 par 6 comprenant 36 fils d'acier ; avec 0,930 kilogramme de chanvre, le poids du cordage, par mètre, est dans l'air de 2,370 kilogrammes et dans l'eau de 1,404 kilogramme ; son diamètre extérieur est de 35 millimètres. Il résiste à une traction effective de 19 tonnes, avec un allongement de 10 p. 100.

Bien que l'on ait construit ainsi des cordages résistant à 29 tonnes, certains ingénieurs, pour draguer dans de grandes profondeurs supérieures à 1000 brasses, préfèrent se servir de cordages exclusivement composés de chanvre de Manille, les cordages mi-partie métalliques, par leur poids, augmentant dans une proportion considérable la tension et rendant par suite le dynamomètre moins sensible. Dans des fonds de 2000 brasses par exemple, un cordage de 4 par 4, avec les maillons de jonction, le grappin et sa chaîne et l'effort nécessaire pour labourer le fond de la mer, fait monter la tension à 3500 kilogrammes.

On reproche, d'un autre côté, aux cordes de chanvre pur d'être aisément entraînées par les courants sous-marins et de prendre ainsi, durant leur immersion, une direction curviligne qui allonge inutilement la drague et peut même, à un certain moment, la faire traîner sur le fond où elle s'use et se coupe rapidement, surtout lorsque ce fond est rocailleux. On peut éviter ce dernier inconvénient au moins, en reliant la chaîne qui fait suite au grappin à 500 mètres de cordage 6 par 3 auquel on ajoute ensuite la longueur nécessaire de cordage en chanvre pur. On n'est exposé ainsi à traîner sur le fond qu'une partie du cordage en fils d'acier. Dans l'Atlantique, avec 2000 brasses de corde en chanvre de Manille, la tension moyenne a été réduite de 3500 à 2000 ou 2500 kilogrammes, et bien qu'elle se fût élevée accidentellement parfois à 9 tonnes, il ne s'est produit aucune rupture dans le filin de chanvre.

Le même système combiné de cordages mi-partie métalliques dans le fond et de cordes exclusivement en chanvre par-dessus, peut être employé pour les bouées. On évite de cette manière l'emploi de bouées de trop grandes dimensions.

Les cordages en chanvre et fils d'acier sont divisés en pièces de longueur, variables et bien définies, 100, 200, 400... brasses et assemblées ensuite à l'aide de *maillons de jonction*. Cette division permet de former toujours facilement la longueur totale de cordage dont on a besoin dans chaque cas particulier, et est commode pour se rendre compte rapidement, sans recourir au compteur, des longueurs de filins qu'on a déjà immergées ou, en cas de relèvement de la drague, de celles restant encore à la mer. Il convient néanmoins d'éviter une division exagérée des filins de drague qui doivent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

être conservés en pièces aussi longues que possible. Elle est indispensable, au contraire, pour les filins de bouées dont les longueurs immergées varient nécessairement avec la profondeur de la mer.

Chaque extrémité d'une pièce de filin est recourbée sur elle-même, en laissant un vide que l'on nomme *œil* (fig. 168), et enroulée sur une pièce de

FIG. 168.

fer oblongue, à section demi-circulaire que l'on appelle *cosse*. Cette disposition a pour but d'empêcher le filin de se plier, sous l'effort de la traction, à court rayon sur l'anneau qui est engagé à demeure dans la cosse et de briser ainsi les fils d'acier. Les cordages élémentaires dont le filin est composé sont mariés ensuite aussi étroitement que possible, à l'aide d'une *épissoire*, avec ceux du brin principal du filin sur une longueur d'un mètre environ; le tout est enveloppé d'une bonne couverture de bitord serrée à la mailloche.

MAILLONS DE JONCTION

Les maillons de jonction entièrement en fer (fig. 169), servant à l'assemblage de deux bouts de cordages, comprennent une pièce centrale nommée *émerillon*, de chaque côté de laquelle se trouvent un anneau et une *manille*.

L'émerillon (fig. 170) se compose d'un étrier percé à la base d'un trou à travers lequel passent les deux extrémités d'une tige en fer rond, recourbée en forme de boucle; une bague en fer, fraisée et rivée aux deux extrémités réunies de cette tige, permet au bout mâle de l'émerillon de tourner tout autour du bout femelle, mais sans pouvoir prendre aucun déplacement longitudinal.

L'agitation superficielle de la mer, qui se traduit par un mouvement de rotation presque continu des bouées, ne semble donc pas pouvoir se propager le long d'un cordage muni de maillons de jonction. Les émerillons toutefois ne peuvent jouer que quand la traction exercée sur eux n'est pas trop considérable; dans le cas contraire, l'adhérence de leurs deux parties est telle, que la force de torsion du cordage ne peut la vaincre, et celle-ci se transmet alors tout le long du filin, comme à travers une barre rigide. Comme il est rare qu'une petite longueur de cordage ne traîne pas sur le fond de la mer, c'est sur cette partie que vient se reporter tout l'effort résultant de la rotation de la bouée. Aussi trouve-t-on souvent, lorsqu'on relève une bouée qui a été immergée pendant plusieurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

jours, surtout durant de mauvais temps, l'extrémité du filin complètement décordée. Sa résistance étant ainsi sensiblement diminuée, une rupture devient possible, et la bouée devenue libre peut s'en aller à la dérive avec presque tout son filin. A ce point de vue encore l'emploi de cordages mixtes,

Fig. 169.

Fig. 170.

Fig. 171.

mi-partie métalliques, à partir de la chaîne jusqu'à 2 ou 300 brasses du fond, faisant suite à une corde en chanvre de manille seulement, qui aboutit à la chaîne de la bouée, est avantageux et doit être recommandé.

Les *manilles* (fig. 171) se composent d'un fer à cheval dont les extrémi-

Fig. 172.

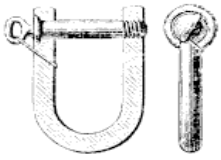


Fig. 173.

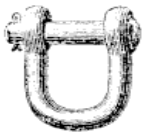


Fig. 174.

tés libres sont élargies et percées de deux trous dans lesquels on peut engager une forte vis ; l'un des trous est fileté intérieurement. La tête de la vis, très peu saillante, porte une partie évidée (fig. 172) dans laquelle on introduit une pièce de fer aplatie pour la manœuvrer. La longueur de la vis doit être telle que, lorsqu'elle est engagée à fond, la partie filetée fasse à peine saillie sur l'autre bord du fer à cheval.

Ces manilles sont de beaucoup préférables à celles (fig. 173) dont la tête est formée d'un anneau que l'on maintient en place, lorsque la tige est serrée à bloc, à l'aide de fil à ligature tourné autour de la branche voisine du fer à cheval. Ce fil, en effet, se coupe assez facilement lorsque la manille peut venir buter contre un corps dur, tel qu'une bouée, et ces chocs répétés contre la tête de la manille finissent par desserrer la vis

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui s'échappe du fer à cheval, en laissant libre la chaîne qu'elle devait servir à retenir[1].

L'anneau de ces dernières manilles a, en outre, l'inconvénient de former une saillie très prononcée, de telle sorte qu'en passant sur le tambour de la machine de relèvement, il saisit parfois au passage le cordage du tour qui le précède et le tord en un instant. Il devient nécessaire alors de couper cette partie du cordage et de refaire une nouvelle épissure. On a même vu, et le fait n'est pas unique, un câble remonter sur la drague jusqu'au navire, à travers une épaisseur d'eau de plusieurs centaines de brasses, porté seulement par la tête de la manille d'assemblage du grappin.

On obtient également une excellente fermeture de la manille en faisant dépasser d'un centimètre environ la partie filetée de la vis et la perçant d'un trou dans lequel on engage soit un ressort en acier dont on écarte ensuite les deux branches (fig. 174), soit une cheville en bois de bouleau que l'on enfonce à coups de maillet. Ces deux systèmes sont sujets cependant au dernier inconvénient que nous venons de signaler, et pour ce motif ne doivent pas être employés dans les maillons de jonction des filins de dragues ou de bouées, mais peuvent rendre de très bons services sur les chaînes de bouées ou de champignons.

Les anneaux en fer que l'on introduit dans les cosses et ceux qui entrent dans la constitution des maillons de jonction doivent être faits avec des épaisseurs de fer leur permettant de résister à une traction au moins égale à celle que peuvent supporter les cordages qu'ils sont destinés à assembler. Avec du fer rond de très bonne qualité, de 21 à 26 millimètres de diamètre, on obtient des pièces résistant respectivement à des tractions de 11 à 16 tonnes. La longueur intérieure des anneaux doit être telle que, lorsqu'ils sont engagés dans l'œil d'un filin ou dans l'étrier d'un émerillon, il reste un espace vide suffisant pour y passer l'une des extrémités du fer à cheval d'une manille. Il est prudent, en raison de leur forme plus ouverte, de les faire confectionner avec du fer ayant 2 millimètres de diamètre de plus que les autres parties des maillons. Des soins particuliers doivent être apportés à leur confection, des vices de construction et même de simples défauts de fabrication pouvant avoir à la mer les conséquences les plus fâcheuses.

[1] Relation des opérations effectuées en 1880-1881 pour la réparation du câble Marseille-Alger de 1871, par l'auteur. *Annales Télégraphiques*, année 1887, p. 4, 112, 115 et 122.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 2. — CHAINES EN FER

Les cordages de dragues et de bouées sont reliés aux grappins et aux champignons par de fortes chaînes en fer qui traînent sur le fond de la mer, d'une part, pour que la traction sur le grappin ou le champignon se fasse parallèlement au sol, et d'autre part pour éviter l'usure rapide d'un cordage mi-partie en chanvre, surtout dans le cas où il reposerait sur une arête de roches.

Les chaînes dont on se sert à cet effet sont ordinairement divisées en pièces de 30 mètres de longueur, et terminées à chaque extrémité par un anneau dans lequel on peut introduire une manille d'assemblage.

Des chaînes servent encore à relier les bouées à leurs cordages, à hisser à bord les deux parties d'un câble qu'on a coupé sur son grappin, sans compter de nombreux mouvements qui ont un rapport moins direct avec la manipulation même des câbles.

Ces chaînes doivent être en fer rond, de qualité supérieure, sans étais: les étais se dessoudent quelquefois et la résistance d'une chaîne dont un seul étai s'est détaché accidentellement se trouve diminuée dans une proportion considérable. Avec du fer de 18 millimètres, on obtient des chaînes résistant à une traction de 7 100 kilogrammes; avec du fer de 20 millimètres, des chaînes résistant à 8 800 kilogrammes.

Toutes ces pièces en fer, sans exception, de même que des échantillons des divers cordages employés, doivent être soumises, avant leur embarquement, à des tractions d'épreuve, suivant leurs spécifications respectives, et impitoyablement rejetées s'il se produit une déformation ou une craquelure quelconque.

§ 3. — CHAMPIGNONS

On donne le nom de *champignons* à des engins destinés à ancrer les bouées au fond de la mer. Ils se composent d'une grande cuvette en fonte (fig. 175) à bords biseautés portant en son centre une tige en fer; cette tige est terminée par un renflement évidé, dans lequel a été forgé un gros anneau en fer. Sous la cuvette se trouve un petit anneau dans lequel on peut passer un crochet relié à une corde, de manière à pouvoir manœuvrer facilement le champignon sur la plate-forme du gaillard d'avant. Les champignons, par leur poids, s'enfoncent dans la vase qui recouvre généralement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le fond de la mer, au delà des profondeurs de 200 à 300 brasses, et, par leur surface, s'opposent à un déplacement quelconque de la bouée, avec bien plus d'efficacité qu'un grappin à branches séparées.

Les bords des champignons sont quelquefois taillados en zigzags (fig. 176) pour en faciliter l'entrée dans certaines vases très compactes.

Le poids des champignons varie, suivant leurs dimensions, de 50 à 250 kilo-

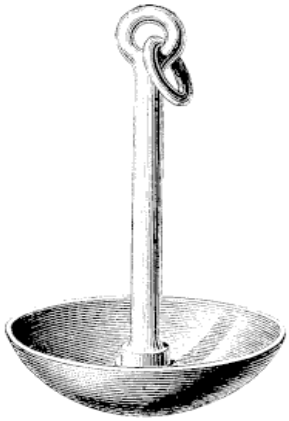


Fig. 175.

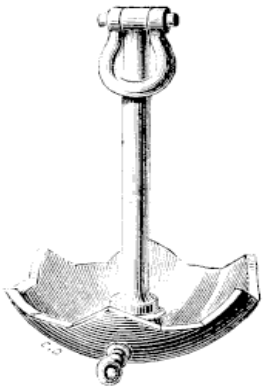


Fig. 176.

grammes. On les fixe, à l'aide d'une manille, à l'extrémité de la chaîne qui fait suite aux cordages de bouée proprement dits, lorsque la bouée n'est destinée qu'à servir de repère. Lorsqu'au contraire elle est reliée à un câble, le champignon est fixé à l'extrémité d'un bout de chaîne de deux ou trois brasses de longueur que l'on attache à la chaîne principale, à quatre ou cinq brasses du câble. Le champignon supporte ainsi seul tout l'effort de traction de la bouée, lorsqu'elle est poussée par le vent ou les courants, et laisse le câble reposer sur le fond sans fatigue.

§ 4. — GRAPPINS

Les grappins, du modèle le plus ordinaire, se composent d'une tige en fer (fig. 177, 178) terminée, à l'une de ses extrémités, par une partie renflée, évidée en son milieu et dans laquelle se trouve engagé un fort anneau en fer ; à l'extrémité opposée de cette tige sont soudées plusieurs pièces en fer rond, d'une forme évasée, effilées à leur bout libre, qui constituent les *branches* ou *pattes*. En arrière du point de jonction des pattes se trouve un petit anneau qui sert à attacher un poids derrière le grappin, pour l'obliger à mieux s'enfoncer dans la terre, lorsque, par suite

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la nature rocailleuse du fond, il a une tendance à bondir d'un point à un autre, sans labourer le terrain régulièrement.

Le nombre des branches des grappins varie de trois à six ; quatre

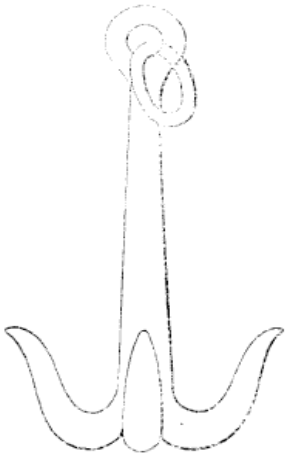


Fig. 177.

Fig. 178.

branches donnent un excellent engin. Le poids de ces grappins varie de 50 à 250 kilogrammes.

Lorsqu'on drague dans les terrains rocailleux, on attache quelquefois un second grappin derrière le premier, à l'aide d'une chaîne de quatre ou cinq brasses de longueur. Le poids de cette chaîne oblige, comme nous

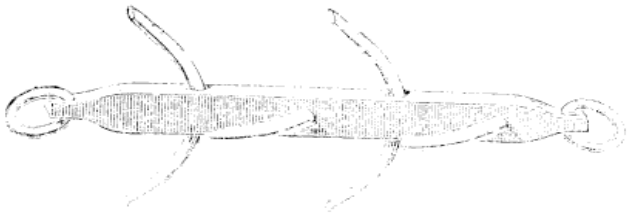


Fig. 179

venons de l'indiquer, le premier grappin à s'enfoncer plus profondément dans le sol et à le draguer plus régulièrement ; on peut, en outre, espérer au moins que si des sauts se produisent, les deux grappins ne sauteront pas par-dessus les mêmes points ; on a donc plus de chance de draguer tout le terrain. Mais il arrive souvent que l'un des grappins s'engage dans la chaîne de l'autre, et qu'ainsi ils ne draguent bien ni l'un ni l'autre ; aussi est-il en général plus sage de ne faire usage que d'un seul grappin.

Le grappin *centipède* (fig. 179) se compose d'une forte barre de fer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

carré, portant un anneau à chaque extrémité et percée de part en part, sur des faces alternées, de trous dans lesquels on engage solidement des tiges en fer légèrement recourbées et pointues à leurs deux extrémités. Le grappin ainsi formé présente, les unes derrière les autres, plusieurs rangées de pattes qui peuvent successivement saisir le câble, dans le

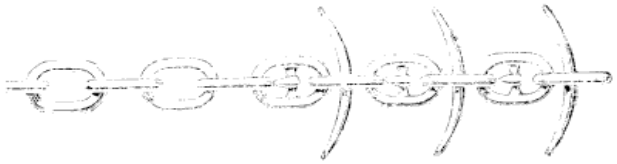


Fig. 180.

cas où celui-ci aurait échappé accidentellement aux pattes précédentes. Ce grappin, est en outre, très facile à fabriquer, et les branches cassées ou tordues peuvent être remplacées sans qu'on ait besoin d'une forge à bord. L'anneau qui termine ce grappin est, comme celui qui se trouve en arrière du grappin ordinaire, destiné à recevoir un bout de chaîne ou un poids additionnel.

Quelquefois, on encastre dans les derniers anneaux d'une forte chaîne des étais auxquels sont fixées, dans une direction perpendiculaire à la leur, des branches doubles de grappin (fig. 180). On obtient ainsi une sorte de grappin analogue au précédent et qui peut rendre de bons services.

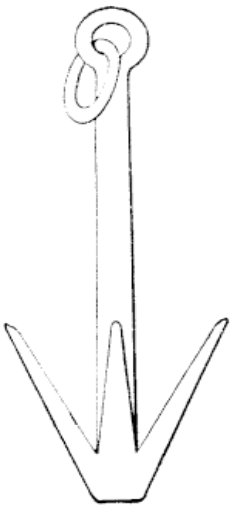


Fig. 181.

Lorsque l'on drague près de l'extrémité cassée d'un câble, on risque de voir le bout libre, entraîné par le poids de l'autre partie du câble, une fois que le double en a été soulevé à une certaine hauteur, glisser sur les branches du grappin et échapper à la mer. Pour éviter ce genre d'accidents, on se sert de grappins à *retenue*. Les pattes, au lieu d'être raccordées à la tige du milieu suivant une courbe bien arrondie, rencontrent cette tige sous un angle très aigu en forme de V (fig. 181) ; le câble, saisi entre les deux côtés de l'angle, y pénètre plus profondément par l'effet même de son poids, au fur et à mesure qu'il s'élève dans la mer, et ne peut conséquemment plus s'échapper.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

GRAPPIN JAMIESON

Dans les terrains rocailleux, lorsqu'une branche de grappin vient à rencontrer une roche, elle l'arrache si celle-ci n'est pas trop grosse ou trop résistante, ou se redresse et même se brise ; elle peut quelquefois étaler le navire. Lorsqu'une branche est redressée ou brisée, le grappin ne drague plus ; le travail se continue donc en pure perte. Le relevage et l'immersion d'une drague pouvant, suivant les profondeurs, durer plusieurs heures, on ne peut toujours vérifier l'état d'un grappin, et on est par suite exposé souvent, dans les terrains rocailleux, à draguer inutilement. Frappé de ces considérations, et désireux d'éviter les pertes de matériel que l'on éprouve généralement dans ces circonstances, M. A. Jamieson a imaginé un grappin *à branches articulées*, se relevant d'elles-mêmes sous une pression déterminée que l'on peut régler à l'avance, et reprenant leur position primitive dès que l'effort sous lequel les branches se sont redressées vient à cesser d'agir sur elles.

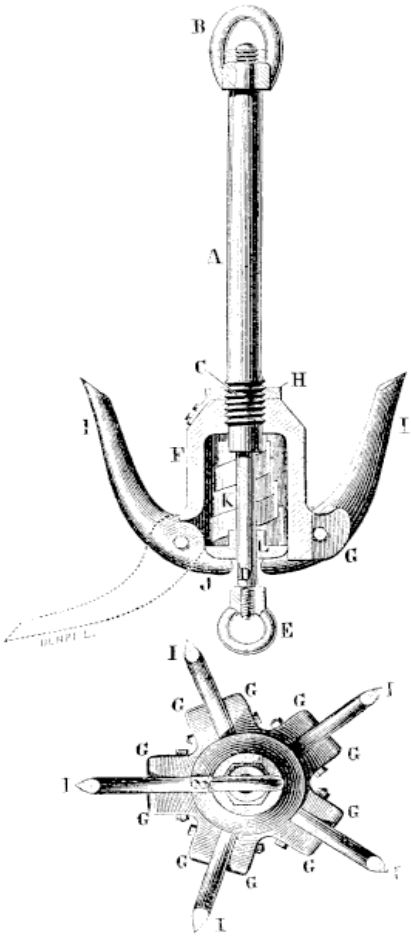


Fig. 182.

Ce grappin (fig. 182) se compose d'une forte tige en fer rond A terminée à l'une des extrémités par un gros anneau B maintenu par un écrou, et mobile tout autour de A ; à son autre extrémité, elle porte un long filet de vis C très robuste et se prolonge par une partie amincie D : un petit anneau E, vissé au bout de la tige D, sert de point d'attache à la chaîne qu'on laisse traîner derrière le grappin. Sur la tige A est vissée une boîte F en fer, en acier ou en bronze, à la base de laquelle se trouvent, venus de fonte avec elle, dix petits appendices G disposés régulièrement par groupes de deux sur toute sa périphérie : un écrou H, relié à la boîte F par des plaques en fer et des boulons, assure la fixité relative de tout le système. Entre chaque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

groupe d'appendices G, on engage la partie aplatie de l'une des branches I du grappin ; une goupille la traverse de part en part, ainsi que les deux appendices voisins et forme un axe autour duquel la branche peut tourner. Celle-ci se prolonge derrière la goupille par un talon arrondi J qui soutient une sorte de piston L, mobile le long de la tige D, et sur lequel vient s'appuyer un fort ressort en acier K enfermé à l'intérieur de la boîte F.

Lorsque les branches de ce grappin rencontrent un obstacle tel qu'une roche, elles tournent autour de leur axe en comprimant le ressort K : dès que l'obstacle est paré, le ressort agissant sur les prolongements J des branches force celles-ci à reprendre leur position normale. On peut régler la tension du ressort et l'angle d'écartement des branches, en remontant ou abaissant la boîte F le long de la vis C et en retirant ou introduisant des plaques de caoutchouc entre le ressort et le piston L.

Ce grappin, lorsqu'il est bien entretenu, fonctionne parfaitement et rend d'excellents services.

GRAPPINS A BRANCHES COUPANTES

Le grappin *à branches coupantes* a une forme analogue au grappin à retenue : la partie inférieure des côtés intérieurs du V formé par les branches avec la tige centrale, porte des dents de scie ou des lames de couteaux parfaitement affilées. Le câble, sollicité par son poids, pèse de plus en plus sur ces parties tranchantes et ne tarde pas à être coupé.

Le grappin que nous venons de décrire a été employé par la *Medway*, en 1866, dans les opérations de dragage du câble atlantique de 1865. Les deux bouts échappant au navire qui fait la section, le concours simultané de deux bâtiments était nécessaire, l'un pour couper le câble et l'autre pour en retenir un côté.

On a reconnu depuis que le second navire pouvait, sans inconvénient, être remplacé par une simple bouée. Malgré cette facilité relative, les avantages que présenterait un grappin permettant, à bord d'un navire, de couper un câble et d'en retenir à la fois les deux bouts, sont tels que les recherches des inventeurs se sont portées avec persistance dans cette direction depuis vingt ans. Mais le problème, ainsi posé, est très difficile à résoudre, car il est malaisé de retenir un câble d'abord et de ne le couper qu'ensuite. Si, d'un autre côté, on coupe d'abord, le bout qui s'engage dans l'appareil de retenue exerce sur celui-ci, dès qu'il est libre, une traction considérable et si brusque que, dans presque tous les cas, il glisse à travers les mâchoires de l'appareil et s'échappe à la mer. Aussi aucun des modèles présentés jusqu'à ce jour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ne résout complètement la question. Nous donnerons, néanmoins, à titre de spécimen seulement de la construction de ce genre d'engins, une description sommaire du grappin imaginé par M. Francis Lambert.

Grappin Lambert.

Une forte tige A est divisée (fig. 183, 184, 185 et 186), à sa partie inférieure, en deux bras arrondis A′, qui sont réunis par une traverse A″ ; à

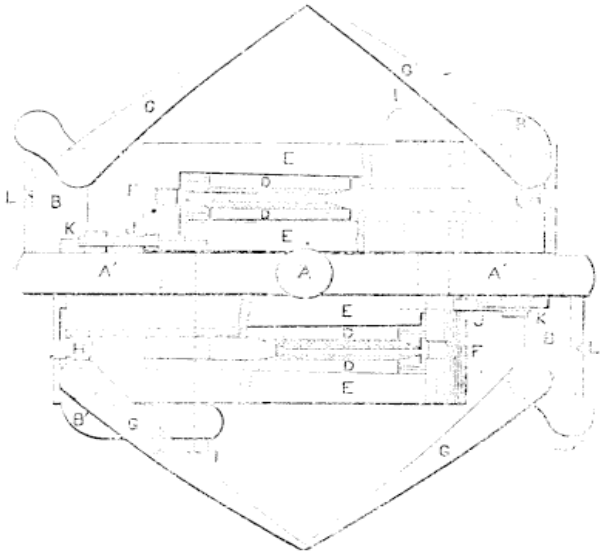


Fig. 183.

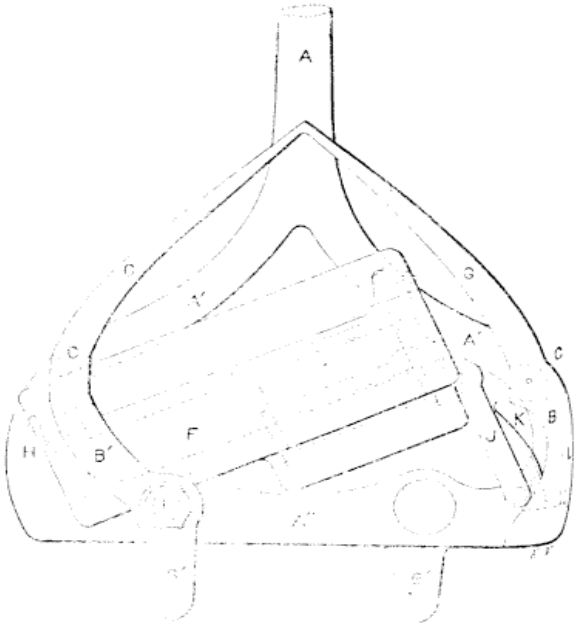


Fig. 184.

cette traverse sont fixées des pièces recourbées B, B′, de formes un peu différentes, qui portent à leur extrémité libre des douilles C, dans lesquelles on engage deux branches de grappin G soudées à leur sommet. Le grappin comprend deux parties symétriques par rapport à la tige A, aux bras A et à la traverse A″, par conséquent deux paires de pièces B et B′, deux paires de branches de grappin G et deux des appareils que nous allons décrire.

L'appareil de retenue se compose d'une paire de mâchoires D D en acier, mobiles entre deux guides E E en acier également et inclinés l'un vers l'autre, de manière à former coin. Les faces extérieures des mâchoires D sont taillées de manière à s'appliquer exactement sur les guides E ; leurs faces intérieures sont striées et légèrement inclinées en forme de V vers

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'extrémité H des guides, pour que le câble soit fortement saisi et serré de plus en plus à mesure qu'il pénètre plus avant dans l'appareil.

Les guides E et les mâchoires D sont montés sur une plate-forme F qui peut tourner autour de l'axe horizontal I. Cet axe, fixé d'un côté à la traverse A″ et de l'autre à la pièce recourbée B′ à laquelle on donne, pour ce motif, une forme spéciale, doit être assez solide pour pouvoir supporter tout le poids du câble. Un crochet J, aidé par un ressort K, maintient en place la plate-forme F lorsque aucune traction n'est exercée sur sa partie inférieure. Le double du câble arrive, conduit par les branches G, entre les guides E.

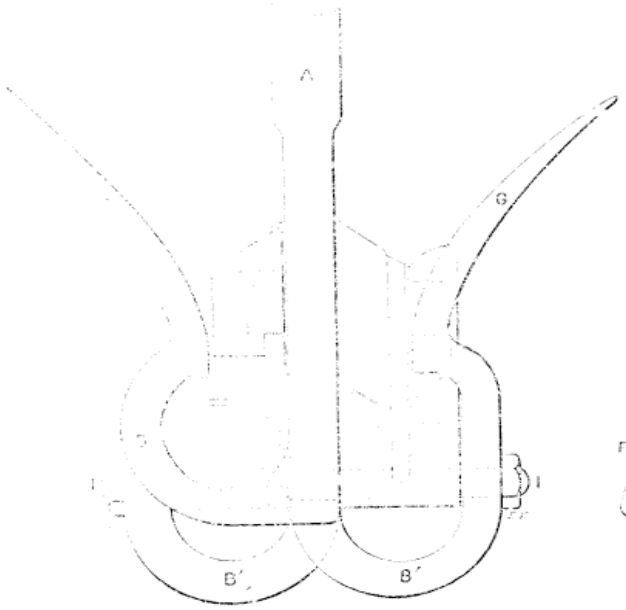


Fig. 185.

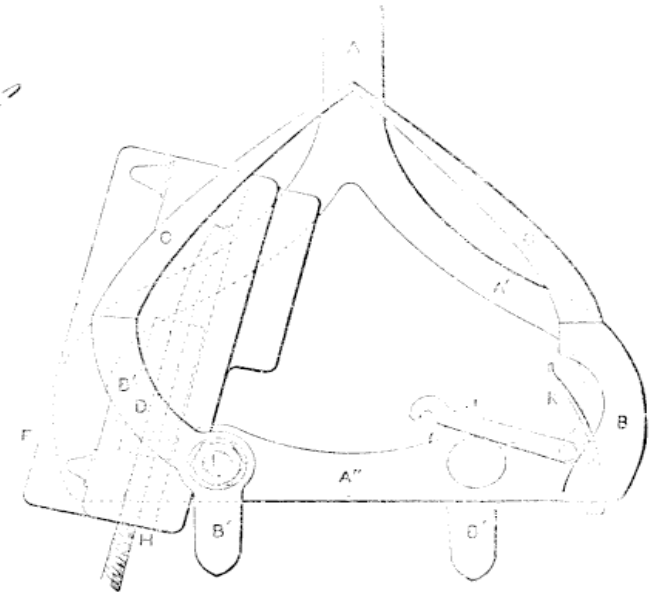


Fig. 186.

d'où il tombe dans l'intervalle libre entre les mâchoires D : le poids du câble fait glisser ces mâchoires vers l'extrémité inférieure H des guides, en même temps que le câble se coupe sur les couteaux L très tranchants, disposés en V dans la partie recourbée de la pièce B. Dès que la pression exercée à l'extrémité H de la plate-forme F dépasse la force du ressort K, le crochet J échappe à son encoche, la plate-forme bascule autour de son axe I et la traction s'exerce longitudinalement sur le bout du câble qui est resté entre les mâchoires de l'appareil, de telle sorte qu'il ne peut être ni détérioré, ni coupé accidentellement pendant qu'on le hisse à bord.

Pour empêcher les pierres et la vase de pénétrer entre les joues et les mâchoires durant le dragage, on enferme la plate-forme dans une boîte en bois munie à sa partie supérieure d'une fente longitudinale qui donne pas-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sage au câble ; cette fente est fermée par un couvercle maintenu par des ressorts qui ne cèdent qu'à la pression du câble.

GRAPPIN KINGSFORD

M. Kingsford a imaginé une forme de grappin dans laquelle le câble, dès qu'il est saisi, met en contact deux pièces métalliques ; il en résulte la fermeture d'un circuit électrique qui actionne une sonnerie. La présence du câble sur le grappin se trouve ainsi révélée presque instantanément à bord et on n'est pas exposé à le traîner avec soi sur une longueur de plusieurs milles, si le dynamomètre n'est pas suffisamment sensible. Ce même contact se produit lorsque l'une des branches du grappin vient à se briser sur un fond rocailleux : on est averti alors d'avoir immédiatement à relever la drague sans perdre inutilement un temps précieux avec un engin devenu incapable de produire le travail demandé.

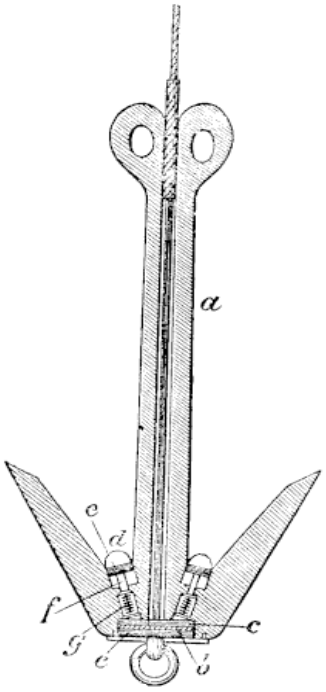


Fig. 187.

A cet effet, la tige *a* (fig. 187) du grappin est creuse et donne passage à un fil métallique isolé ; ce fil se prolonge d'un côté jusqu'au navire à travers le filin de drague dans lequel on a eu soin de l'introduire lors de sa fabrication, et aboutit, de l'autre côté, à une lame de métal *b*, placée entre deux fortes plaques de caoutchouc *c*, dans une cavité ménagée à la partie inférieure du grappin.

Aux points d'intersection des branches et de la tige, se trouvent des boutons *d* divisés en deux parties entre lesquelles on place une épaisse rondelle de caoutchouc *e*. Une aiguille *f* traverse cette rondelle et la partie inférieure du bouton *d*, et repose sur la partie supérieure de la plaque de caoutchouc *e* ; un ressort *g* maintient en temps ordinaire l'aiguille dans cette position. L'eau de la mer a un libre accès à toutes les parties de l'appareil, la lame de métal *b* exceptée, de manière à les soumettre toutes à des pressions égales, lorsque l'on drague dans de grandes profondeurs. Dès que le câble est saisi, il s'engage dans le sommet de l'angle formé par la branche et la tige du grappin, et presse sur le bouton *d* ; l'aiguille *f* perce la plaque de caoutchouc supérieure *e*, et met la lame de métal *b* et le fil conducteur qui lui fait suite en communication avec la mer ; le circuit de la sonnerie

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électrique est donc fermé, et l'on est prévenu à bord de la présence du câble sur le grappin.

Ce système essayé dans de petits fonds a donné de bons résultats. Mais il a l'inconvénient d'exiger l'emploi d'une seule pièce de filin, sans maillons de jonction et par conséquent sans émerillons permettant au grappin de tourner sans tordre ou détordre le cordage : il nécessite, en outre, la suppression de la chaîne qui relie d'ordinaire celui-ci au grappin, et qui est destinée à éviter l'usure rapide de la partie qui traîne sur le fond de la mer. On peut donc présumer que le grappin de M. Kingsford, malgré sa conception ingénieuse, ne pourrait résister à des essais en mer profonde.

§ 5. — BOUÉES

Les formes et dimensions des bouées sont extrêmement variées. Dans les petits fonds, et lorsque la bouée ne doit soutenir qu'un simple filin de chanvre ou d'aloès, on se sert de bouées de forme ovoïde, de 60 à 80 centimètres de hauteur, composées (fig. 188) de plaques de liège as-

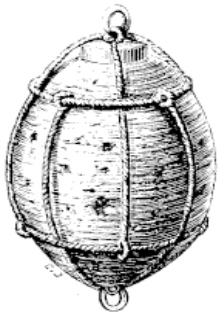


Fig. 188.

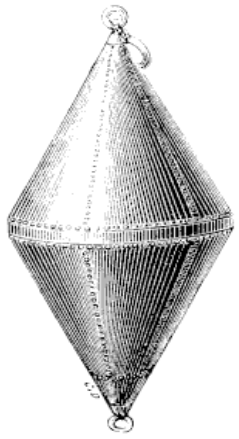


Fig. 189.

semblées et traversées par une tige portant un anneau en fer à chaque extrémité. On fait également usage, dans ces conditions, de bouées en tôle très mince, formées de deux cônes assemblés par leurs bases et garnis d'un anneau en fer à chaque sommet (fig. 189).

Les grandes bouées destinées à supporter des cordages mi-partie métalliques sont construites généralement en tôle d'acier d'environ 4 millimètres d'épaisseur et galvanisée sur ses deux faces. L'une des formes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le plus ordinairement employée est celle d'une sorte de poire (fig. 190) terminée, haut et bas, par deux bases plates de rayons très inégaux. La petite base est percée d'un trou d'homme recouvert d'un couvercle maintenu à l'aide de boulons : ce trou permet à un homme de pénétrer à l'intérieur de la bouée, soit pour y faire des réparations, soit pour vider l'eau qu'elle peut contenir. Trois fers cornières circulaires appliqués, l'un suivant l'équateur, les deux autres aux intersections des parois latérales avec les deux bases, forment la charpente intérieure de la bouée : cette charpente est consolidée par six pièces de tôle disposées verticalement en forme de coin aux jonctions des tôles extérieures avec les fers cornières, à des intervalles angulaires de 60°. Une cloison en tôle, percée en son centre d'un trou d'homme, muni également d'un couvercle, est placée dans le plan de l'équateur et divise la bouée en deux compartiments parfaitement étanches.

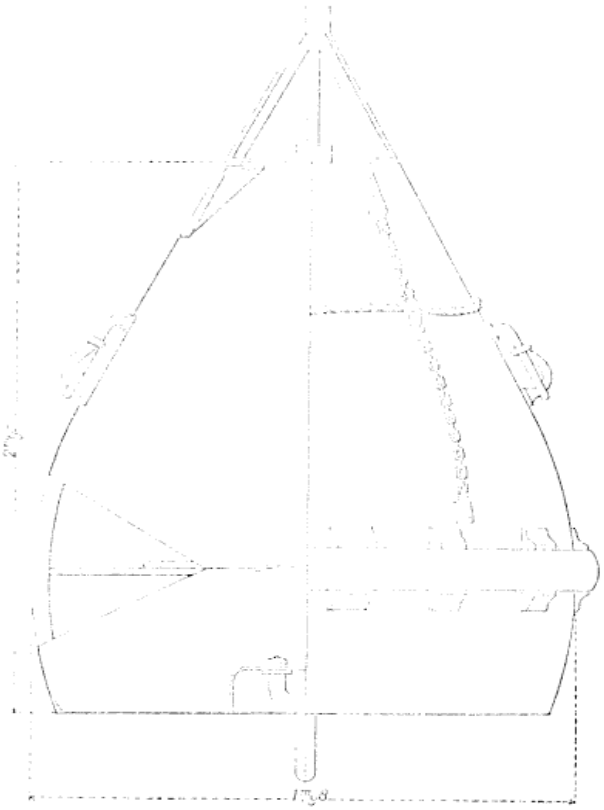


FIG. 190.

Extérieurement, la bouée est garnie, suivant son équateur, d'une défense en bois, de 15 à 20 centimètres de hauteur, sur 10 centimètres d'épaisseur, destinée à amortir les chocs de la bouée contre le navire, les embarcations et autres corps durs qui peuvent accidentellement venir en contact avec elle. Dans les plans de deux méridiens rectangulaires, se trouvent quatre bouts de chaîne qui s'étendent de la petite base à l'équateur et dont les extrémités sont engagées dans des pitons rivés sur la bouée : ces chaînes comprennent un ou deux gros anneaux, lesquels sont traversés par autant de cordages métalliques contournant la bouée.

Sur les flancs de la bouée, dans un même plan diamétral, sont disposés deux verroux composés chacun d'un crochet fixe a, en forme d'ε (fig. 191), et d'une pièce bc, mobile dans un plan perpendiculaire à celui du crochet.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les deux extrémités du crochet sont solidement rivées sur la bouée dont les tôles sont garnies intérieurement, en ces points, de plaques de renfort. La pièce mobile comprend une tige recourbée *b* dont l'extrémité libre peut s'appliquer le long de la partie à peu près rectiligne du crochet, et dont l'autre extrémité *c*, entièrement repliée sur elle-même, embrasse la partie la plus évasée du crochet *a* qui lui sert d'axe de rotation. Une bague *d*, à section allongée, peut saisir simultanément le crochet et la tige, et les rendre parfaitement solidaires, empêchant ainsi tout mouvement particulier de cette dernière. Si donc on a engagé préalablement la tige *b* dans l'anneau d'une chaîne, celle-ci se trouvera liée à la bouée. Pour empêcher la bague de glisser le long du crochet, sous l'influence des chocs répétés que l'agitation de la mer peut lui communiquer ou de toute autre cause, et éviter ainsi de libérer la tige mobile et par suite la chaîne, on chasse, à coups de marteau, entre le haut de la bague et le crochet, une petite plaque en tôle (fig. 192), entaillée à ses deux extrémités de manière à pouvoir s'encastrer solidement entre les deux pièces qu'elle doit maintenir écartées l'une de l'autre. On consolide le tout à l'aide de bitord.

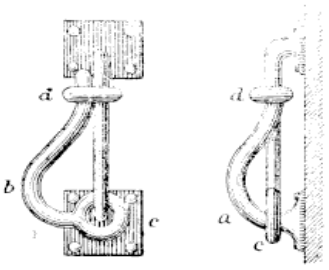


Fig. 191.

Au centre de la grande base, à l'intérieur d'une petite cavité (fig. 193),

Fig. 192.

Fig. 193.

se trouve un fort anneau, mobile autour d'un axe horizontal solidement fixé à la bouée. Quelquefois, cet anneau est remplacé par un conduit en tôle qui traverse la bouée (fig. 194) et débouche, d'un côté au centre de la grande base, de l'autre côté, sous l'un des deux verroux placés sur les flancs; le conduit a une forme telle que la chaîne à laquelle il livre passage ne puisse, en aucun de ses points, porter sur une arête vive.

La chaîne servant à garnir les bouées se compose de deux parties A C et A D (fig. 195) ayant, la première 12 brasses de longueur environ, la seconde 20, et se réunissant à une partie commune A B qui peut n'avoir que 4 ou 5 brasses. Le brin A C passe dans l'anneau placé sous la grande base (fig. 196) ou dans le conduit qui débouche et aboutit à l'un des verroux (fig. 194) : comme il est le plus court, il transmet seul à la bouée le poids des cordages qui font suite à la chaîne; la traction s'exerce ainsi directement sur l'axe de la bouée. Le brin A E D, qui est le plus long, reste mou : l'anneau E est engagé dans le second verrou et le bout D de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaîne est simplement attaché, à l'aide de bitord, dans le haut de la bouée. Ce second brin est utile pour le relevage de la bouée et sert, en cas de besoin, de chaîne de sûreté à la première.

Au-dessus de la petite base (fig. 190), est placé un trépied terminé par

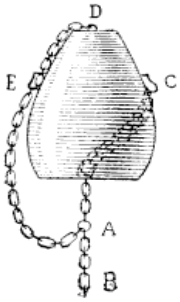


Fig. 194.

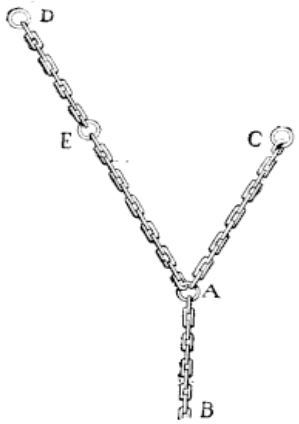


Fig. 195.

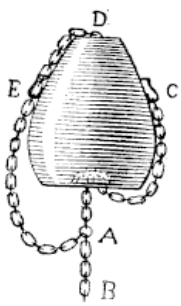


Fig. 196.

un anneau de 5 à 6 centimètres de diamètre et dont l'axe coïncide avec celui de la bouée. Un fourreau en tôle de même diamètre est placé sous la petite base en formant, pour ainsi dire, à l'intérieur de la bouée, le prolongement de l'anneau du trépied. On engage, dans ces deux pièces, un mât garni d'un pavillon qui sert à signaler la bouée au loin. Les pavillons ne flottant pas dans les temps calmes, ou pouvant s'enrouler autour du mât et rendre ainsi la bouée souvent peu visible, on les remplace parfois par des globes d'assez grand diamètre appelés *viseurs* (fig. 197) et formés de bandes d'acier entre-croisées suivant les directions des méridiens et des parallèles.

Lorsque l'on veut draguer pendant la nuit, en vue d'une bouée de marque, on dispose sur son mât de pavillon (fig. 198) deux barres horizontales entre lesquelles on attache des fanaux ou des lampes suspendues à la Cardan et pouvant brûler pendant dix heures consécutives. Pour éviter les pertes de temps et les dangers qu'entraîne le remplacement des fanaux, on a essayé d'éclairer ces bouées à l'aide de gaz d'éclairage comprimé à dix atmosphères, auquel la bouée elle-même servait de récipient. On a obtenu ainsi une flamme brillante, brûlant pendant vingt-deux jours, nuit et jour, sans aucune interruption, même durant de mauvais temps. Quelques difficultés, qui ne sont pas entièrement surmontées, ont surgi cependant dans l'installation du robinet qui doit maintenir constant le débit du gaz. Comme on ne peut, d'un autre côté, renouveler la provision de gaz en cours de campagne, on a été amené à songer à la lumière électrique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a employé, à cet effet, une bobine de Ruhmkorff, un tube à vide et une pile composée de larges plaques de zinc et de charbon, immergées dans la mer, sous la bouée ou à ses côtés.

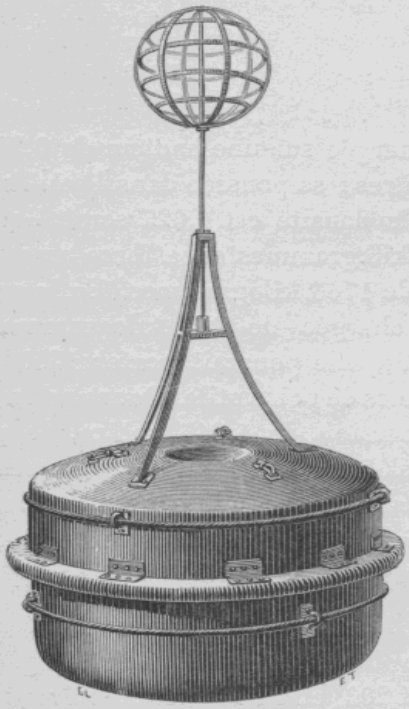


FIG. 197.

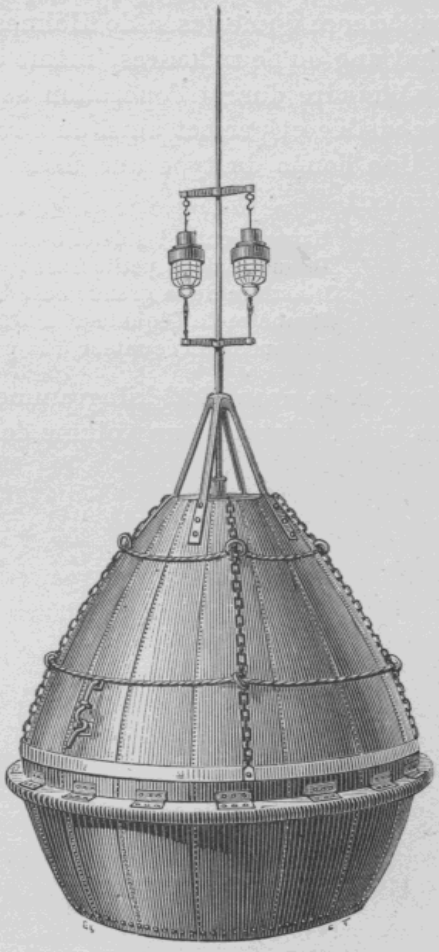


FIG. 198.

Le courant voltaïque traverse le circuit primaire de la bobine d'induction, et la décharge secondaire illumine le tube à vide. Les résultats des essais tentés dans cette voie n'ont toutefois pas été satisfaisants et l'application de l'électricité à l'éclairage des bouées en mer est un problème encore à résoudre. Il est d'ailleurs facile de se rendre compte des avantages de toute nature qu'une solution satisfaisante et économique de la question procurerait aux navires. Toutes les opérations de dragages se continueraient la nuit comme le jour, en vue d'une bouée de marque bien éclairée ; les bouées se découvriraient la nuit plus facilement que le jour ; en cas de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mauvais temps enfin, le navire dans bien des cas pourrait rester à la cape en vue de la bouée, et se retrouverait sur le lieu de ses opérations, prêt à reprendre les travaux, à la première embellie.

Lorsqu'on immerge une bouée pendant la nuit, on la munit à sa partie supérieure d'une fusée de Holmes au phosphure de calcium, qui brûle pendant une ou deux heures, même au contact de l'eau. Si les fanaux viennent à s'éteindre durant l'opération de la mise à l'eau, la fusée continue à rester visible et permet ainsi au navire de s'écarter de la bouée.

Une bouée du type que nous venons de décrire et dont les dimensions seraient

Hauteur entre les deux bases.	2,29	mètres
Diamètre de la petite base	0,60	—
Diamètre de la grande base	1,867	—
Diamètre de l'équateur	2,019	—
Distance de l'équateur à la grande base.	0,60	—

pèserait environ 1092 kilogrammes. Immergée sur une hauteur de 0,94 mètre, elle déplacerait un volume de 2782 litres ; sa poussée dans l'eau de mer dont la densité est 1,027 serait donc de 2857 kilogrammes et sa force ascensionnelle de 1765 kilogrammes. En la supposant chargée de 265 kilogrammes de chaînes, elle pourrait porter 1500 kilogrammes de poids utile. Pour une hauteur d'immersion de 1,015 mètre, le poids utile s'élèverait à 1750 kilogrammes. On a construit sur le même type de très grandes bouées pouvant porter jusqu'à 7 tonnes de poids utile.

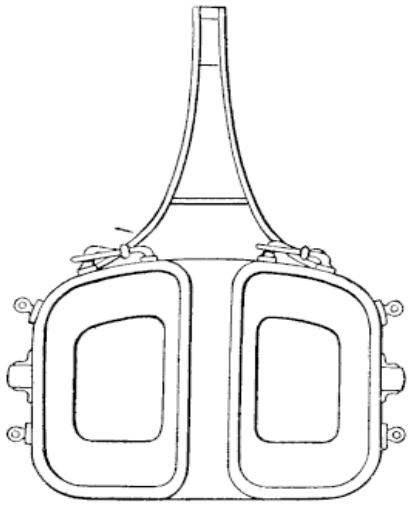


Fig. 199.

On donne quelquefois aux bouées une forme beaucoup plus aplatie (fig. 197, 199 et 200) et on les perce, suivant leur axe, d'un fourreau cylindrique en tôle, avec bords arrondis aux deux extrémités. La chaîne qui soutient le poids du filin passe dans ce fourreau et est rattachée à un verrou d'une forme particulière placé sur la base supérieure.

Ce verrou (fig. 201) se compose d'une forte tige en fer a mobile autour d'un axe horizontal b; un crochet c, fixé à une bague d qui peut tourner autour d'un guide vertical e et glisser le long de ce guide, maintient la tige à l'arrêt, lorsque la partie recourbée du crochet est engagée dans la tige a amenée dans la position verticale. Un bras f fixé à la bague d, à angle droit du crochet, glisse sur une pièce g en fer plat, horizontale, terminée par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des degrés d'escalier (fig. 202). Lorsque le crochet est à l'arrêt, le bras *f* repose sur un degré de l'un des escaliers et il suffit de l'y attacher par

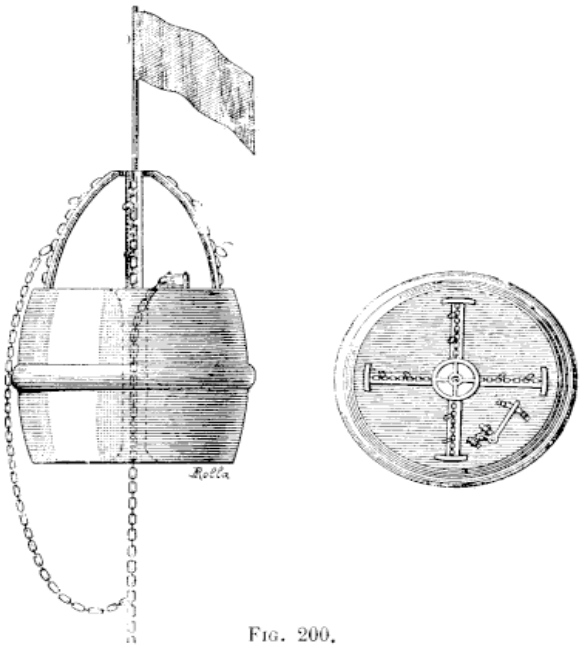


Fig. 200.

quelques brins de fil à ligatures pour rendre tout le système parfaitement rigide. L'anneau qui termine la chaîne d'amarrage de la bouée est engagé préalablement dans la tige *a*.

La charpente soutenant le mât de pavillon (fig. 200) est formée de quatre montants en fer beaucoup plus élevés qui se terminent à un cercle hori-

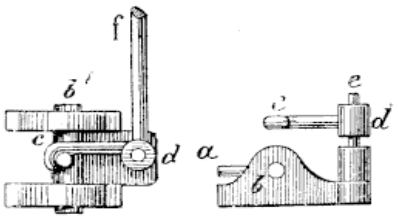


Fig. 201.

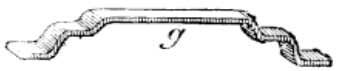


Fig. 202.

zontal ; celui-ci supporte la bague dans laquelle passe le mât. Quatre bouts de chaînes comprenant chacun deux gros anneaux suivent les quatre montants et servent aux manœuvres de la bouée. On fixe, à l'aide d'une manivelle, à l'un de ces anneaux, l'extrémité du second brin de la chaîne d'amarrage de la bouée.

Ces bouées ont l'avantage d'être notablement plus légères et conséquemment de pouvoir porter un poids utile plus considérable. Mais elles sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sujettes à être submergées plus facilement, si on les charge accidentellement d'un poids un peu trop considérable, ou si l'eau vient à pénétrer dans leur intérieur en quantité un peu notable. Elles ont en outre l'inconvénient d'être peu visibles à distance.

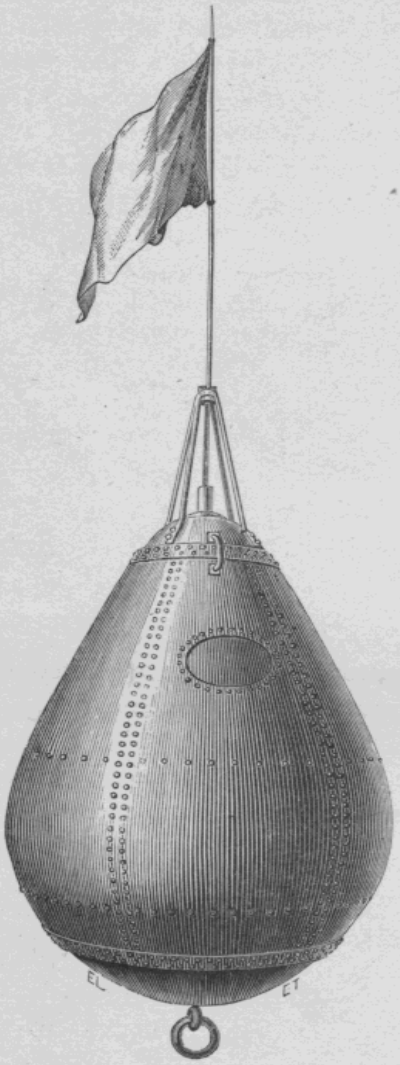


Fig. 203.

Pour les bouées de dimensions moyennes, on emploie généralement la forme ovoïde (fig. 203). La bouée porte latéralement deux simples anneaux auxquels on attache la double chaîne d'amarrage. A sa partie inférieure se trouve un fort piton avec un anneau mobile, à travers lequel on fait passer le brin le plus court de la chaîne afin que la traction s'exerce suivant le grand axe de la bouée et le maintienne dans la position verticale. Un petit viseur ou un pavillon surmonte la bouée à son extrémité supérieure.

IMMERSION D'UNE BOUÉE

La bouée, dégagée de toutes ses cales, est saisie par l'un des cordages en fils de fer qui l'entourent, à l'aide d'une sorte de verrou analogue à ceux qui sont fixés sur les flancs des bouées. Le cordage est engagé dans la partie mobile du verrou dont l'autre partie forme un anneau complet que l'on suspend à une chaîne en fer avec laquelle on hisse la bouée. Une cordelette est attachée à la bague qui, en serrant l'une contre l'autre les deux pièces du verrou, le maintient en place et retient, par suite, le cordage.

On emploie aussi, pour le même usage, une sorte d'anneau coupé en deux moitiés, dont l'une peut tourner autour de l'autre, à l'aide d'une charnière A (fig. 204); la première moitié se termine à son extrémité libre par une partie aplatie B ; la seconde se prolonge par une tige C dans l'épaisseur de laquelle est pratiquée une fente en regard de B. En faisant tourner les deux moitiés de l'anneau autour de la charnière, la partie B s'engage dans la fente ; on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

recouvre le tout d'une bague D que l'on fait glisser le long de la tige C, de manière à assurer la fixité relative de tout le système. Une goupille E qui traverse la tige C un peu au-dessus de la bague, empêche, en outre, tout glissement accidentel de celle-ci, lorsque l'anneau doit rester fermé. On soulève la bague D à distance, à l'aide d'une cordelette : les deux moitiés de l'anneau s'ouvrent et permettent à la chaîne, entraînée par son poids, de s'en échapper.

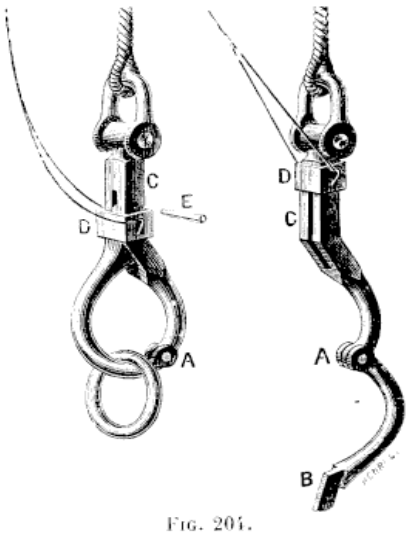


Fig. 204.

La bouée garnie de sa double chaîne et de son mât de pavillon, avec les lanternes et la fusée de Holmes, le cas échéant, est hissée à l'aide d'un treuil, par-dessus les bastingages ; on attache l'extrémité inférieure de la chaîne au bout d'une corde que l'on a portée de la roue de relèvement à la bouée, en passant en dehors de tout le gréement du navire. On hale la corde sur le gaillard d'avant, jusqu'à ce que le bout de la chaîne paraisse sur la plate-forme. On l'y amarre à l'un des anneaux fixés sur les poutres en fer.

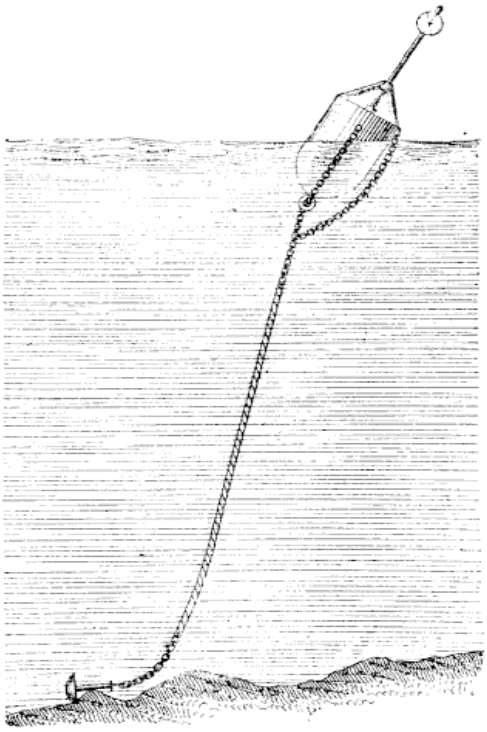


Fig. 205.

Pendant que ces opérations s'effectuent, on immerge le champignon, la chaîne en fer et la longueur du filin mixte ou en chanvre jugée nécessaire, d'après un sondage fait au point même où se trouve le navire. Lorsque le dernier maillon de jonction du filin arrive sur la plate-forme, on le bosse et on le relie, d'une part, à la chaîne de la bouée et d'autre part à une corde en chanvre que l'on enroule sur le tambour de la machine de relèvement, et on amène en même temps la bouée jusqu'au ras de l'eau. On dévire à la machine très doucement jusqu'à ce que le point de jonction de la chaîne, du filin de bouée et du cordage en chanvre, ait dépassé la roue

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de relèvement ; si le filin de bouée ne se présentait pas de l'avant du navire, celui-ci devrait immédiatement marcher doucement en arrière. On accélère ensuite la marche de la machine et on tire sur la ficelle qui retient la bague du verrou de suspension de la bouée : celle-ci devenue libre tombe à l'eau et file rapidement le long du bord pour se placer verticalement au-dessus du filin (fig. 205). Le navire fait machine en arrière pour se dégager de la bouée et on coupe à la hache la corde en chanvre.

Lorsque la bouée est destinée à soutenir un câble tendu supporté par un grappin, à une certaine hauteur dans l'eau, il convient d'éviter, au moment où la tension du filin se transmet du navire à la bouée, une secousse qui pourrait faire décapeler le câble du grappin. Dans ce cas, on continue à dévirer la corde en chanvre jusqu'à ce que le navire se trouvant suffisamment écarté de la bouée, celle-ci soit bien d'aplomb et bien assise sur l'eau et que le cordage en chanvre soit devenu complètement mou. On est certain alors que toute la tension du filin est supportée par la bouée et on peut couper le cordage en chanvre sans aucun danger.

RELÈVEMENT D'UNE BOUÉE

Pendant que le navire s'approche de la bouée, on prépare l'armement d'un canot dont tous les hommes, en cas de mauvais temps, doivent être munis de ceintures de sauvetage, et on love, sur le gaillard d'avant, une certaine longueur de filin de chanvre et d'acier, en retournant ensuite la glaîne, pour que le bout en soit libre : le filin qui fait suite à la glaîne est enroulé sur le tambour de la machine de relèvement. Le navire arrive sous le vent de la bouée et s'en approche aussi près que possible; dès qu'il a stoppé et perdu son erre, le canot est mis à la mer et se porte près de la plate-forme d'avant, d'où on lui jette l'extrémité d'un petit cordage, qui passe sur la roue de relèvement, et dont l'autre extrémité est liée au dernier maillon de la glaîne de filin. On hale le cordage à bord du canot jusqu'à ce que le maillon du filin y soit parvenu. L'embarcation se dirige alors vers la bouée et le navire déroule au fur et à mesure le filin : arrivé à la bouée, un homme saute sur la défense en bois et introduit dans un anneau une corde dont il rejette ensuite le bout au canot ; celui-ci reste amarré ainsi à la bouée, sans être exposé à se trouver brisé contre elle par le choc des vagues (fig. 206)

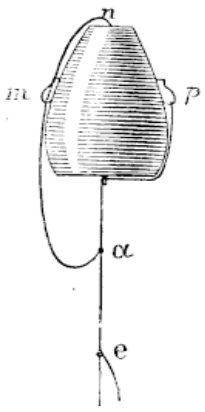


FIG. 207.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

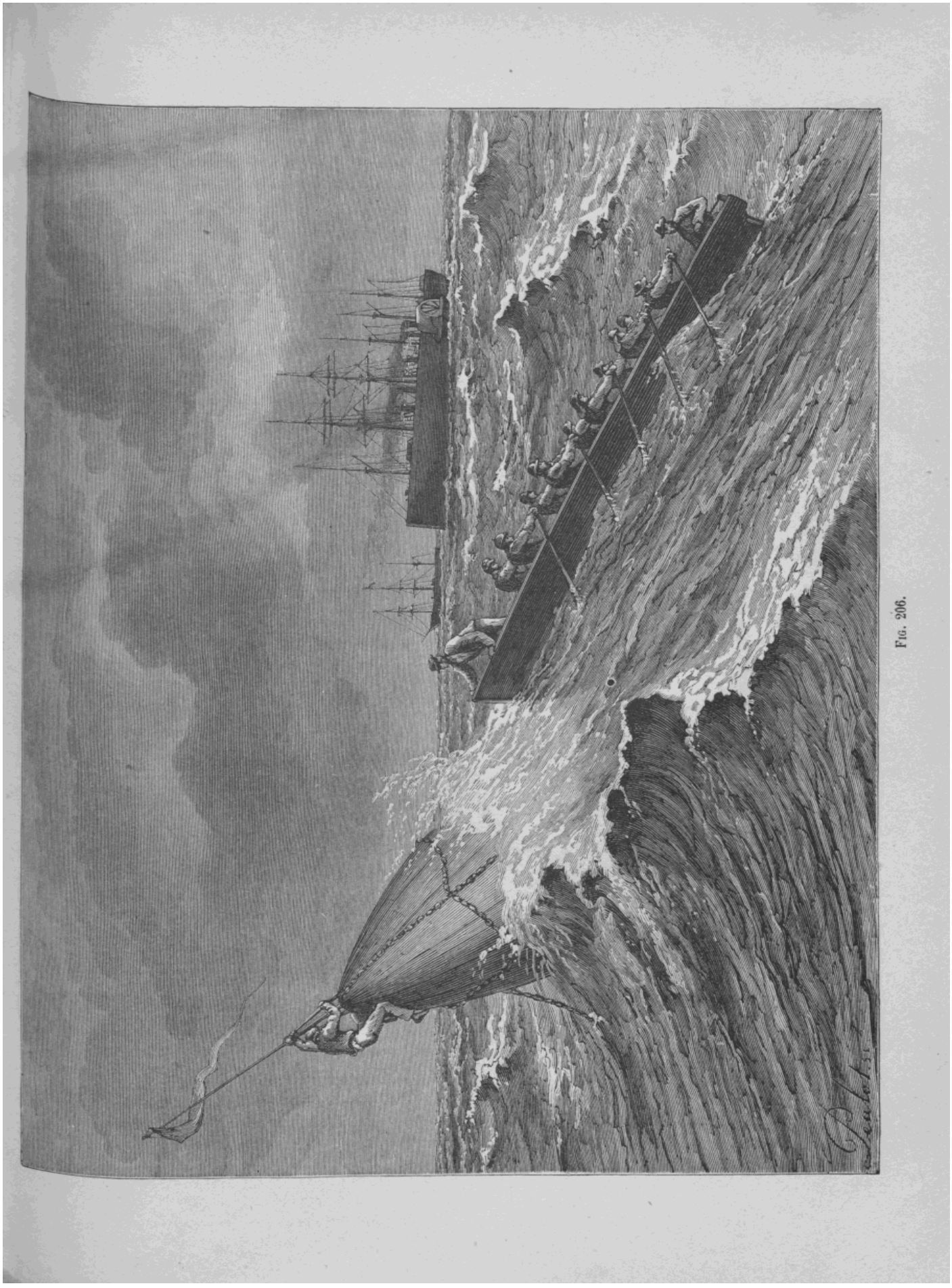


Fig. 206.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'homme retire successivement les fanaux et le mât de pavillon, coupe le bitord qui retenait sur la petite base en *n* (fig. 207) l'extrémité du plus

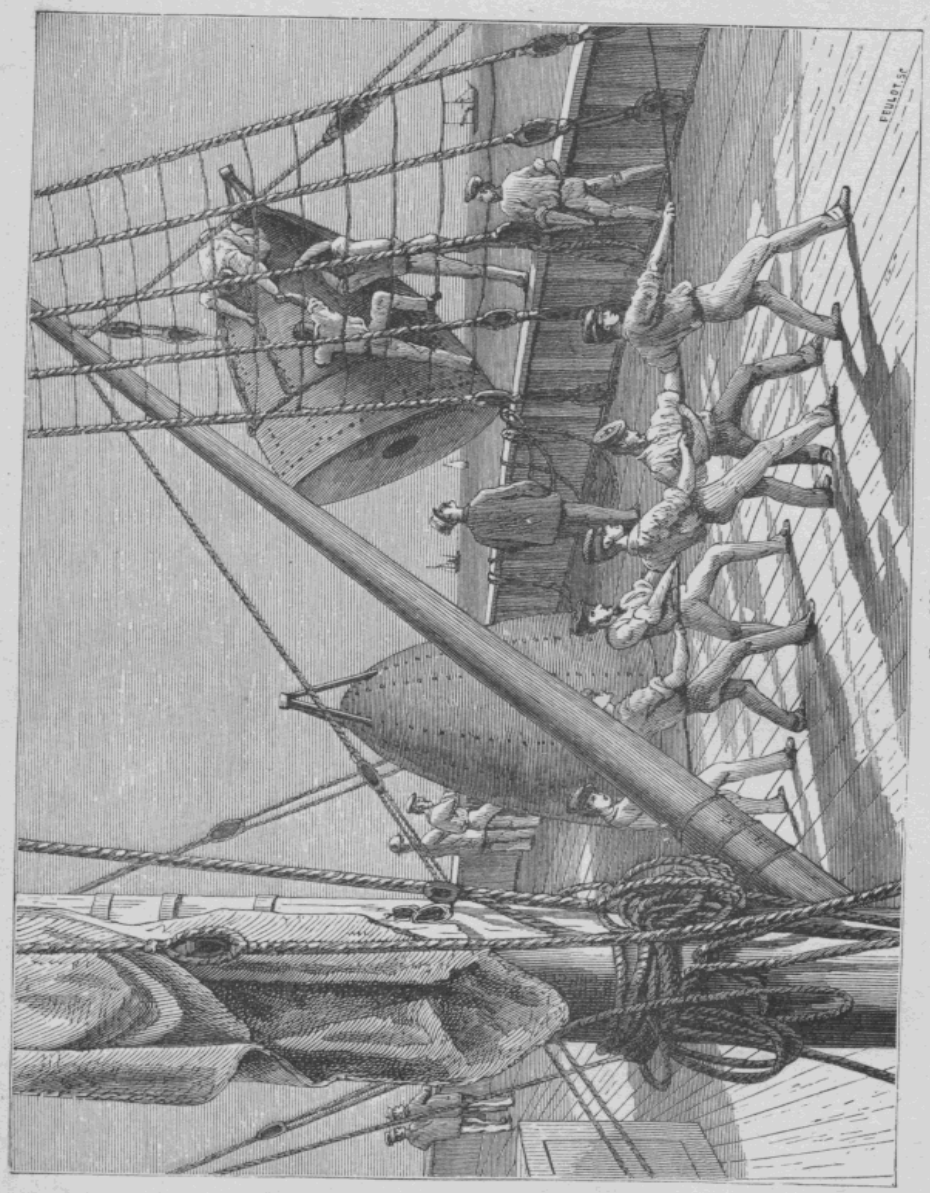


Fig. 208.

long brin de la chaîne et attache, à l'aide d'une manille, l'anneau qui la termine au maillon du filin.

Il enlève ensuite les plaques de garde qui maintiennent en place les bagues des deux verroux de la bouée, rentre dans l'embarcation, fait em-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

barquer par le navire le mou du filin, et, à l'aide d'un coup de marteau donné sur la bague du verrou m, en fait sauter la partie mobile et dégage le plus long brin de la chaîne d'amarrage.

Lorsque la tension du filin que la machine de relèvement continue à haler à bord, et la hauteur de la partie immergée de la bouée lui montrent que celle-ci ne supporte plus le poids du cordage qui la relie au champignon, il repousse au marteau la bague du second verrou p; le crochet mobile de ce verrou tombe et laisse échapper le brin le plus court de la chaîne d'amarrage. La bouée, entièrement dégagée, est remorquée par le canot jusqu'au navire où elle est saisie par un cordage en fil de fer à l'aide de l'un des systèmes de crochets que nous avons décrits, et hissée ensuite à bord (fig. 208).

Pendant ce temps, la machine de relèvement amène sur la plate-forme l'anneau a (fig. 207) : dès qu'il a dépassé la roue d'avant, on stoppe un instant pour dégager le bout libre ap de la chaîne et on le retire à la main. On procède de même un peu plus loin, lorsque se présente l'anneau e auquel est relié le cordage en chanvre, qui a servi à régler l'immersion de la bouée. On amène, en outre, à l'avant du navire, le bout d'un cordage que l'on relie directement avec celui qui vient de la mer et qu'on a eu soin de bosser préalablement. On dégage partout la chaîne, on enroule le nouveau filin sur le tambour de la machine de relèvement et, dès que les bosses sont largues, on peut reprendre l'opération du relevage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VIII

SONDAGES ET EXPLORATIONS SOUS-MARINES

§ 1er. Sondages. — Machine à sonder de sir W. Thomson. – Plombs de sonde. — Sondages volants. — Bathomètre.
§ 2. Température des eaux de la mer. — Thermomètres de Casella-Miller, de Siemens ; enregistreurs automatiques de Neumayer, de Michaëlis. — Croisières scientifiques.

§ 1er. — SONDAGES

Le procédé universellement employé pour mesurer la profondeur de la mer consiste à y laisser tomber un plomb, de forme tronc-conique, très allongé, attaché à une cordelette en chanvre préalablement divisée en brasses. Un homme laisse filer la *ligne* entre ses doigts et a la sensation très nette de l'instant où le plomb touche le fond : il n'a plus qu'à reconnaître la division de la ligne correspondant au niveau de l'eau. En mettant du suif dans une excavation pratiquée sous la base du plomb, une petite quantité du sable, du gravier ou de la vase sur laquelle repose le plomb, s'y attache et remonte avec lui en indiquant ainsi la nature du sol.

La surface rugueuse des cordes formant obstacle à leur glissement dans l'eau, on est conduit, lorsque les fonds s'abaissent, à augmenter le poids du plomb et, par suite, la force de la ligne de sonde. Jusqu'à deux ou trois cents brasses de profondeur, on peut obtenir ainsi des sondages suffisamment exacts. Au delà de cette limite, les cordes qu'il devient nécessaire d'employer présentent une surface considérable et peuvent se trouver entraînées par les courants sous-marins, en dehors de la direction verticale passant par le navire : la déviation étant d'autant plus grande que la durée de la chute du plomb est plus longue, les résultats obtenus ainsi, au bout de deux heures, dans des fonds de mille brasses et au-dessus, peuvent être absolument erronés. D'un autre côté, le poids de la corde immergée venant s'ajouter à celui du plomb, un homme seul ne peut plus, dans les grandes profondeurs, en soulever l'ensemble et par suite s'assurer si le plomb a ou non touché le fond. Le poids de la partie déjà immergée de la ligne suffi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sant seul, à un certain moment, à en déterminer le déroulement, on voit que celui-ci peut continuer ensuite, lors même que le plomb a déjà atteint le fond. La corde se love alors d'elle-même au fond de la mer et pour ainsi dire indéfiniment ; la longueur de la ligne, lorsque le déroulement en est arrêté, n'a donc plus aucun rapport avec la profondeur que l'on veut mesurer. Le temps nécessaire à la double opération de l'immersion et du relevage d'une corde en chanvre peut atteindre ainsi cinq ou six heures, durant lesquelles il est difficile de maintenir en place le navire lui-même, d'où une nouvelle cause d'erreur qui vient s'ajouter aux autres. Si l'on tient compte, en outre, des dépenses considérables que nécessite une série de sondages exécutés dans ces conditions, on voit qu'un appareil donnant avec exactitude et rapidité la profondeur de la mer, quelle qu'elle soit, en un point quelconque, était devenu indispensable pour les opérations de télégraphie sous-marine. C'est à sir William Thomson que revient l'honneur d'avoir imaginé, en 1872, l'appareil que nous allons décrire et qui a rendu, depuis, de nombreux et importants services, non seulement à l'industrie des câbles sous-marins, mais à la science elle-même, en augmentant et rectifiant les connaissances si imparfaites que l'on avait jusqu'alors sur le véritable profil du fond des mers.

MACHINE A SONDER DE SIR W. THOMSON

Sir W. Thomson employa, comme ligne de sonde, du fil d'acier pour pianos, de qualité extra-supérieure, de 0,7 millimètre de diamètre, pesant 6,560 kilogrammes par mille et ne se rompant que sous un effort de 115 à 120 kilogrammes. Ce fil, dont la surface est très lisse et la section très faible, n'est pas sujet aux inconvénients que nous avons signalés pour les cordes en chanvre ; mais il a une grande tendance à former des boucles qui, à la moindre traction, donnent des coques, lesquelles déterminent la rupture du fil. Pour les éviter, il faut que la partie du fil déroulée soit toujours tendue et par conséquent qu'aucune portion n'en puisse venir toucher le fond de la mer : on arrive à ce résultat en reliant le bout du fil, par l'intermédiaire d'un anneau en fer de cinq à six centimètres de diamètre, à quatre ou cinq brasses d'une chaînette en fer ou d'une cordelette en chanvre, dont l'extrémité libre est elle-même attachée au plomb de sonde. Le déroulement s'arrêtant automatiquement et presque instantanément, dès que le plomb a touché le fond, cette longueur de cordelette est suffisante pour laisser le fil de piano suspendu dans l'eau.

L'appareil proprement dit se compose (fig. 209) d'un tambour A en fer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

galvanisé très mince, d'une brasse environ de tour, construit assez légèrement pour qu'il puisse, malgré son inertie, s'arrêter une seconde environ après que le plomb est arrivé au fond : le fil de piano est enroulé sur ce tambour qui est mobile autour d'un axe horizontal B supporté par un bâtis, que l'on peut faire glisser sur deux patins en fer K. Le frein destiné à régler la vitesse de la chute du plomb est formé d'une simple corde en chanvre C, qui est enroulée sur une grande poulie D faisant corps avec le

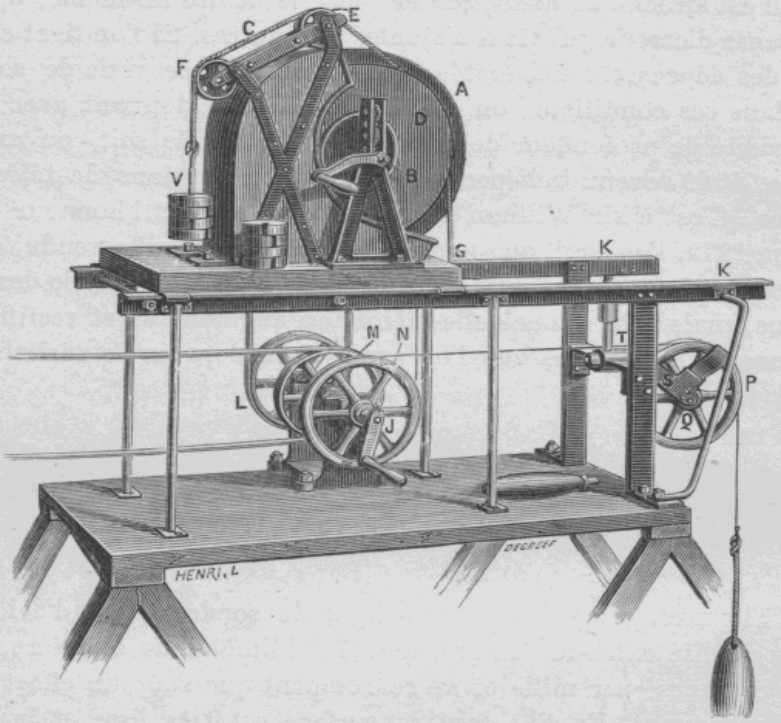


Fig. 209.

tambour et passe sur deux poulies de renvoi E et F : l'une des extrémités G de la corde est attachée au bâti ; l'autre extrémité V soutient des poids que l'on peut faire varier à volonté.

Les patins K font partie d'un second bâti à l'intérieur duquel se trouve un axe J, parallèle à celui du tambour et portant trois poulies : la première L est reliée par une corde sans fin à une poulie placée sur l'axe B derrière le tambour ; la deuxième M est mise de la même manière en communication avec un treuil à vapeur ; la troisième N, placée directement sous le tambour, est creusée d'une gorge assez profonde. En avant du bâti inférieur et dans le plan de la poulie N se trouve une poulie P, à gorge, pouvant tourner autour d'un axe horizontal Q ; la chape S de cette poulie est inclinée et se

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

termine par une tige T, perpendiculaire à Q, et formant un axe autour duquel tout le système est mobile. La tige T prolongée porte un contrepoids destiné à faire équilibre au poids de la poulie P. Sur la chape S se trouvent deux petites plaques légèrement évasées, qui affleurent les bords de la poulie P et sont destinées à recueillir le fil, dans le cas où il s'échapperait accidentellement de la gorge de cette poulie.

Pour faire un sondage avec cette machine, on stoppe le navire et on fait glisser le bâti supérieur sur les deux patins, de manière à amener le tambour au-dessus de la poulie P ; on le maintient dans cette position à l'aide de chevilles qui traversent les patins. Le bâti inférieur étant ordinairement placé à l'extrême-arrière du navire, le tambour surplombe ainsi directement la mer. Un homme saisit le plomb par l'anneau qui termine le fil de piano et, dès que le navire a perdu son erre, abandonne le poids qui tombe à la mer en entraînant avec lui la ligne.

On suit sur un compteur en communication avec l'axe B le déroulement du fil ; à chaque centaine de brasses immergée, on place en V une petite rondelle en plomb, dont le poids est calculé de manière à faire exactement équilibre sur le tambour, par l'augmentation de frottement de la corde du frein, au poids de 100 brasses de fil de piano. Il en résulte que la force qui détermine le déroulement du fil reste sensiblement constante à partir du moment où le plomb quitte le navire. Si le poids du plomb de sonde, de la cordelette de chanvre et de l'anneau de fer est de 18 kilogrammes, par exemple, et si la retenue exercée par le poids V, sans les rondelles additionnelles, est de 6 kilogrammes, la force d'entraînement du système mobile sera constamment de 12 kilogrammes. Dès que le plomb touchera le fond, cette force sera remplacée par la retenue du frein agissant en sens inverse avec une force de 6 kilogrammes ; le déroulement sera donc arrêté presque instantanément, et on verra le tambour faire au plus encore un tour ou deux, à ce moment.

Le compteur donne en brasses la longueur de fil déroulé. Si celui-ci est sensiblement vertical, cette longueur représente exactement la profondeur de l'eau. Si le navire est dressé par le vent ou des courants, le fil fait avec la verticale un angle que l'on mesure approximativement ; on en déduit facilement la hauteur cherchée.

Pour relever la ligne, on ramène le tambour en arrière, on fait passer le fil sur la poulie P et sur la poulie N dont elle embrasse toute la circonférence ; on retire la corde C du frein, et on embraye, sur le treuil à vapeur, la courroie qui s'enroule sur la poulie M.

Les rayons des poulies L et R étant calculés de telle sorte que les vitesses à la circonférence sur la poulie N et le tambour soient les mêmes, le fil s'enroule de lui-même sur le tambour : il suffit de le guider à la main,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour que la bobine de fil soit bien régulière. Lorsqu'on n'a plus que 25 ou 30 brasses de fil à relever, on arrête le treuil à vapeur et on termine l'opération à la main, à l'aide de deux manivelles dont est muni l'arbre J. La poulie P étant mobile autour de deux axes rectangulaires, se place toujours dans le plan déterminé par les deux brins de fil, celui venant de la mer et celui compris entre les deux poulies P et N ; le fil reste donc toujours au fond de la gorge de la poulie, sans risquer de se couper sur les bords et avec peu de tendance à s'en échapper.

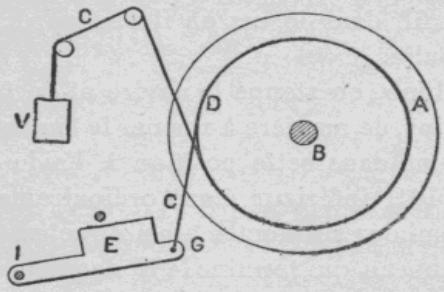


FIG. 210.

Lorsqu'il devient nécessaire d'arrêter le fil pendant la descente ou la montée du poids, on le bosse à l'aide d'une cordelette fixée par son milieu à la partie antérieure du bâti de l'appareil ; les deux brins entre-croisés sont tournés plusieurs fois autour du fil de piano et fortement serrés, de manière à produire la retenue désirée.

Il est prudent toutefois, pour éviter une rupture du fil, de le manipuler avec les mains le moins possible, lorsque le plomb est à la mer.

Quelquefois l'extrémité G (fig. 210) de la corde C du frein, au lieu d'être attachée à un point fixe, est reliée à un poids E, mobile autour d'un axe I et dont la course est limitée par un arrêt. On fait varier ce poids ainsi que le poids V d'après la vitesse de descente que l'on veut donner au plomb, et on obtient avec cette disposition un réglage plus facile et un mouvement du tambour plus doux.

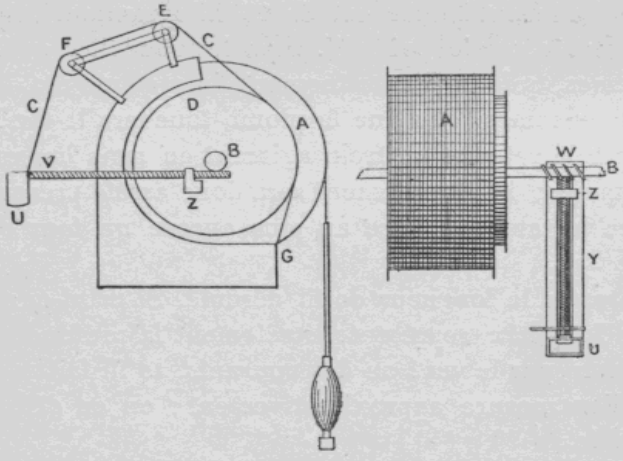


FIG. 211.

A bord de la *Dacia*, les rondelles de plomb que l'on doit ajouter au poids V, par chaque centaine de brasses de fil déroulé, ont été remplacées par un système automoteur très ingénieux, qui dispense de toute manœuvre pendant la descente du plomb. L'axe B du tambour est prolongé et porte une vis sans fin W (fig. 211), engrenant avec une roue dentée qui est montée sur un axe Y fileté sur toute sa longueur et terminé par un contrepoids U ; ce contrepoids est relié à l'extrémité libre de la corde du frein.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le long de l'axe Y peut se mouvoir un poids Z, fileté intérieurement et maintenu par des guides. Lorsque le fil de piano se déroule, le poids Z se déplace vers l'extrémité V de l'axe Y, augmentant ainsi la charge qui pèse sur la corde C : la longueur du pas de vis et les poids U et Z sont calculés de telle sorte que le mouvement du plomb soit uniforme. En observant, d'ailleurs, à une montre à secondes le temps employé par le poids pour parcourir des intervalles de cent brasses et ajoutant au poids U ou en retirant quelques petites rondelles de plomb, on obtient rapidement et facilement, dans chaque cas particulier, une vitesse uniforme. Lorsqu'on remonte le plomb de sonde, on enlève la corde C, mais on laisse l'axe A embrayé avec la roue d'angle de l'axe Y ; le poids Z revient ainsi naturellement à l'extrémité W de cet axe, lorsque tout le fil de piano est enroulé de nouveau sur le tambour.

Pour éviter la rouille du fil de piano, l'homme qui le guide pendant

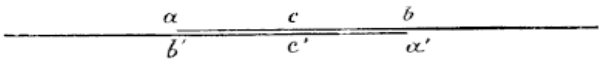


FIG. 212.

l'enroulement sur le tambour le laisse filer à travers une poignée d'étoupe qu'il tient à la main. Lorsque l'opération est terminée, on retire le tambour et on le plonge dans une caisse contenant une solution de soude caustique ou de chaux : il est bon de s'assurer, à l'aide d'un papier réactif, de l'alcalinité de la dissolution, afin que l'on soit certain de neutraliser l'acide carbonique dissous dans l'eau, seule cause de l'oxydation du fer sous l'eau. La soude ayant l'inconvénient de ronger les soudures, on préfère quelquefois la remplacer par de l'huile.

Lorsque l'on effectue une série de sondages, on doit retirer de temps en temps le tambour et le porter dans le bain de soude ou d'huile et le remplacer par un tambour de rechange, afin de prévenir l'oxydation du fil par un usage trop prolongé.

La marine royale anglaise a fait usage, dans ces derniers temps, de fils d'acier galvanisés qui dispensent de l'emploi d'une solution préservatrice. Les résultats obtenus sur deux navires, durant une campagne d'une année, ont été des plus satisfaisants[1].

Pour épisser l'une sur l'autre deux pièces de fil de piano, on en chauffe très légèrement les bouts que l'on enduit d'un peu de glu marine ramollie par la chaleur. On en réunit les deux extrémités *ab*, *a'b'* (fig. 212) sur une longueur d'un mètre environ : tenant les deux fils par leur milieu *cc'*, on enroule la partie *ac* autour du fil *c'b'* en donnant à l'hélice un pas de 25 millimètres environ, et la partie *a'c'* autour du fil *cb*; les extrémités

[1] *Journal of the Society of telegraph Engineers and Electricians*, vol. XVI, p. 513

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de ces torsades sont recouvertes, sur une longueur de 10 centimètres, de fil de caret bien serré autour des deux fils de piano. Quelquefois, on enroule sur les fils d'acier, réunis comme nous venons de l'indiquer, de petits fils de cuivre fin, sur une longueur de 2 centimètres environ, séparés par des intervalles vides de même longueur, et on soude à l'étain toutes les torsades de cuivre.

PLOMBS DE SONDE

Les plombs de sonde sont formés d'une masse de plomb, de forme ovoïde, à la partie inférieure de laquelle est fixé un petit tube en fer percé de trous ; une bague également en fer (fig. 213) se visse sur le bout du tube et reçoit à frottement dur une pièce de caoutchouc, de forme conique, fendue suivant quatre génératrices, la pointe du cône étant dirigée vers l'intérieur du tube. Cette pièce en caoutchouc permet l'introduction dans le tube d'un échantillon du fond de la mer et suffit à le retenir pendant l'ascension de la sonde.

Fig. 213.

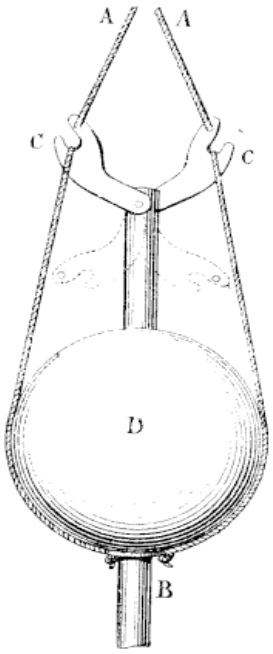


Fig. 214.

Dans les très grandes profondeurs, lorsque le poids de la ligne et du plomb, joint au frottement longitudinal de l'eau, peut faire craindre une rupture du fil de piano, on sonde à plomb perdu. Le système imaginé à cet effet, en 1856, par le lieutenant Brooke, de la marine des États-Unis consistait en une boule en fer D (fig. 214) percée verticalement, de part en part, d'une ouverture cylindrique dans laquelle on engageait un tube en fer B. Deux bras C, munis chacun d'une encoche, étaient mobiles autour d'un axe horizontal fixé au tube. La ligne A était attachée solidement à ces bras dans les encoches desquels passait le double de la cordelette qui soutenait la boule D. Lorsque la sonde touchait le fond de la mer, le poids de la boule faisait retomber les bras C qui prenaient la position indiquée en traits pointillés sur la figure ; la cordelette échappait aux encoches

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et, en halant à bord la ligne A, le tube B remontait seul avec un échantillon du fond, contenu dans son intérieur.

Cet appareil a été modifié de diverses manières. Une des formes les plus simples qui lui aient été données est représentée par la figure 215 et est due à M. Benest. La boule en fer porte latéralement deux petits crochets dans lesquels on engage deux bouts de fil d'acier reliés à la cordelette en chanvre ou à la chaînette qui fait suite à la ligne : un troisième bout de fil relie directement le tube à cette même cordelette. Dès que la boule touche le fond, les fils latéraux échappent aux crochets et le tube, garni de vase ou de sable, remonte seul avec la ligne.

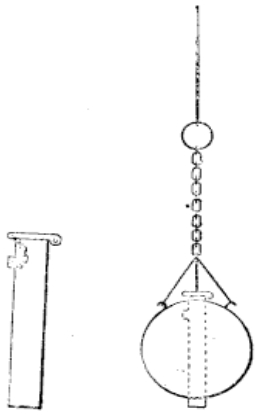


Fig. 215.

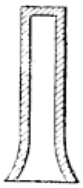


Fig. 216.

Le tube est fermé à sa partie supérieure par un couvercle que maintient fermé un petit ressort intérieur, à sa partie inférieure par une soupape s'ouvrant de l'extérieur à l'intérieur. Quelquefois il est entièrement ouvert et légèrement évasé dans le haut, et complètement fermé par le bas (fig 216). On l'engage alors renversé dans la boule en fer : une collerette que porte celle-ci autour de son ouverture inférieure et deux ressorts placés à l'intérieur de sa partie évidée maintiennent le tube en place, pendant la descente ; le fil qui le relie à la ligne est attaché au bout évasé. Lorsque la boule a touché le fond et est devenue libre, le tube traîne un instant sur le sol en se remplissant de sable ou de vase et reprend sa position naturelle lorsqu'il remonte avec la ligne.

Les bras mobiles de l'appareil de Brooke pouvant ne pas fonctionner lorsque tout le système a pénétré très profondément dans de la vase très molle, et le plomb, d'un autre côté, se détachant du tube trop vite pour que celui-ci puisse suffisamment s'enfoncer dans la vase lorsqu'elle est un peu plus résistante, M. Stallibrass s'est proposé d'éviter à la fois ces deux inconvénients : l'appareil qu'il a fait construire dans ce but est un perfectionnement du type créé antérieurement par M. Sigsbee-Belknap.

La ligne de sonde est reliée par une tige pleine au tube qui doit rapporter un échantillon du fond (fig. 217); cette tige peut glisser sur une petite longueur à l'intérieur du tube vers lequel tend à la ramener constamment un ressort en spirale S. Le double de la cordelette qui soutient la boule en fer est soutenu par une pièce plate H mobile autour d'un axe invariablement lié au tube : cette pièce est maintenue, pendant la descente de l'appareil,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans la position que représente la figure de détail A, par un doigt D qui est fixé à la tige pleine et qui passe à travers une fente du tube. Dès que le fond est atteint, le ressort S, qui se trouvait tendu durant la descente, rappelle la tige pleine ; la pièce H bascule, mais est arrêtée par le doigt D dans la position figurée en B. La boule continue par suite à agir par son poids

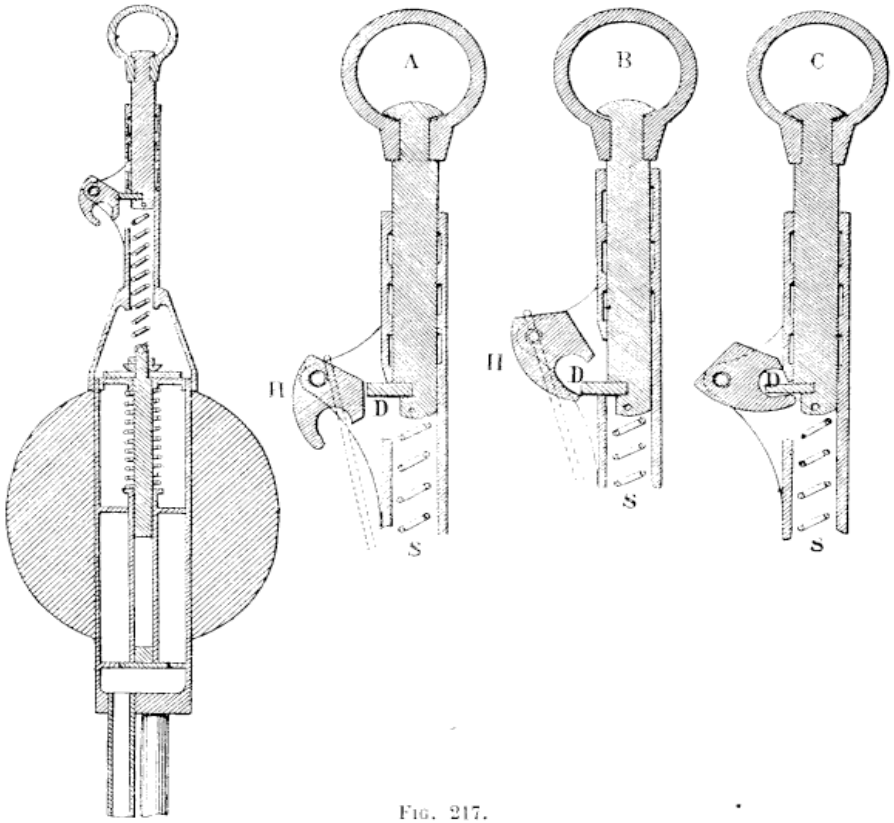


Fig. 217.

sur le tube et l'oblige à s'enfoncer dans la vase. A l'instant où à bord on commence à haler la ligne, la tige pleine avec le doigt D se relève, permettant ainsi à la pièce H de prendre la position figurée en C ; la cordelette qui retenait la boule échappe alors complètement à la pièce H et le tube devenu libre remonte seul à la surface.

Le tube est divisé à sa partie inférieure, suivant une disposition qui avait été adoptée précédemment par l'*India-Rubber, Gutta-percha and telegraph Works C°*, en trois tubes de diamètres plus petits qui prennent des échantillons du fond. La partie la plus large du tube retient, à l'aide d'une soupape à ressort, de l'eau du fond de la mer qu'elle rapporte avec elle

A bord du *Faraday*, on se sert de poids en fonte terminés par un anneau à l'aide duquel ils sont suspendus dans un crochet que l'on attache à l'ex-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trémité de la ligne ; ce crochet est fermé par un ressort (fig. 218) s'ouvrant de l'intérieur vers l'extérieur. Dès que le poids touche le fond, le ressort repousse le crochet en dehors de l'anneau qui se trouve ainsi dégagé avec le poids. Les sondages sont très rapides par ce procédé, mais ne donnent pas d'échantillons de la nature du fond.

Avec un poids de 16 à 18 kilogrammes de la forme que nous avons décrite en premier lieu, on obtient facilement une vitesse moyenne de

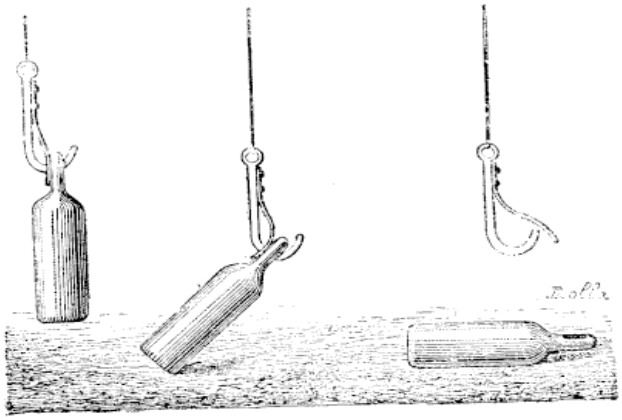


Fig. 218.

100 brasses en une minute quinze secondes ou une minute vingt secondes, à la descente comme à la montée. Un sondage complet dans une profondeur de 1500 brasses, y compris le temps nécessaire à la manœuvre de l'appareil à bord, entre les deux parties de l'opération, dure environ trente-cinq à quarante minutes. On peut même gagner du temps en route pendant le relevage de la ligne de sonde. Si l'on se trouve au-dessus de fonds de 3000 brasses, on peut commencer à marcher très doucement, dès que 500 brasses de fil sont embarquées ; lorsque la longueur relevée atteint 1500 brasses, la vitesse du navire peut être portée à 5 ou 6 nœuds sans inconvénient ; lorsqu'il ne reste que 1000 brasses à relever, on peut filer 10 nœuds et enfin 12 nœuds même, lorsque la longueur de fil à relever ne dépasse plus 7 à 800 brasses. Lorsque l'on a à exécuter une série de sondages, l'économie de temps ainsi réalisée devient très appréciable.

SONDAGES VOLANTS

Dans des profondeurs de 200 brasses et au-dessous, on peut exécuter des sondages *volants* que l'on effectue sans ralentir la vitesse du navire,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pourvu que cette vitesse ne dépasse pas 5 ou 6 nœuds ; la longueur de fil à la mer étant en effet de 350 à 400 brasses au maximum, le relevage en est toujours aisé. Mais cette longueur ne correspond plus, même approximativement, à la profondeur de l'eau. Le fil forme en effet alors une ligne

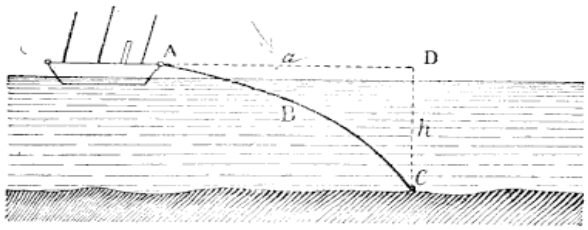


FIG. 219.

courbe telle que A B C (fig. 219) très différente de la verticale D C à mesurer.

Si a = A D représente le chemin parcouru par le navire depuis le moment où on a laissé tomber le plomb jusqu'à celui où il a touché le fond, ce chemin étant diminué de celui parcouru dans le sens horizontal par le plomb C lui-même pendant le même temps ;

h = D C, la hauteur de la mer au point où le plomb touche le fond ;

l A B C la longueur de fil déroulée ;

on a manifestement

$$l < (a + h) \qquad l > \sqrt{a^2 + h^2}$$

d'où

$$h > (l - a) \qquad h < \sqrt{l^2 - a^2}$$

Avec un peu d'habitude, on arrive facilement à déduire de ces deux limites, avec une approximation suffisante, la valeur de la hauteur h du fond. Les renseignements que l'on peut recueillir de cette manière, en route, sont parfois très précieux, soit pour l'immersion d'un câble, soit pour les besoins de la navigation ordinaire.

Lorsque l'on désire plus de précision dans les sondages volants, on attache à la cordelette en chanvre qui fait suite au fil d'acier, à une brasse environ de l'anneau, un des indicateurs de pression imaginés également par sir W. Thomson. Le premier consiste en un tube de verre, fermé à l'une de ses extrémités, recouvert sur sa paroi intérieure d'une matière colorante, telle que le bleu d'aniline ou le prussiate rouge de potasse, qui est décoloré par l'eau de mer, ou mieux encore le chlorate d'argent. Le tube rempli d'air est attaché, *renversé*, à la ligne de sonde, c'est-à-dire avec le bout fermé en haut ; il est protégé par un tube de garde en laiton.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A mesure que le tube descend dans la mer, l'eau entrant par le bout ouvert comprime la colonne d'air et décolore la matière colorante avec laquelle elle se trouve en contact. Lorsque le tube remonte à bord, il suffit de mesurer la hauteur de la partie décolorée du tube pour en conclure, à l'aide d'une table dressée à l'avance ou d'une règle graduée, la pression à laquelle la colonne d'air a été soumise et par suite la hauteur de la colonne d'eau qu'elle a supportée.

Le second indicateur de pression consiste en un tube de verre protégé également par une enveloppe de métal et muni à ses deux extrémités de soupapes s'ouvrant toutes les deux du dehors en dedans. Lorsque le tube descend dans la mer, la soupape inférieure s'ouvre et laisse pénétrer l'eau qui refoule l'air dans la partie supérieure du tube. Dès que celui-ci commence à remonter, la soupape inférieure se ferme et retient l'eau qui est entrée dans le tube pendant la descente ; d'autre part, la pression de l'eau de mer agissant sur la soupape supérieure force celle-ci à s'ouvrir, permettant ainsi à l'air comprimé dans le tube de s'échapper graduellement, à mesure que l'appareil se rapproche de la surface, mais sans laisser rentrer l'eau. La pression de l'air intérieur est ainsi constamment équilibrée par celle que la mer exerce à l'extérieur du tube, de sorte qu'il n'y a pas à craindre que celui-ci n'éclate par suite de la pression de l'air qu'il renferme, lorsqu'il arrive aux profondeurs où la pression extérieure est moindre. Pour déterminer la profondeur atteinte par l'appareil, on mesure à l'aide d'une règle convenablement graduée, la hauteur de la colonne d'eau contenue dans le tube ; on en conclut immédiatement la profondeur.

BATHOMÈTRE

M. C. W. Siemens s'est proposé de mesurer la profondeur de la mer sans ligne de sonde. Il est parti de l'idée que la gravitation totale de la terre, mesurée à sa surface, se compose des attractions séparées de toutes ses parties et que l'influence attractive des diverses matières varie en raison directe de leur densité et en raison inverse du carré de leur distance au point où se prend la mesure. La densité de l'eau de mer étant de 1,027 environ et celle des solides constituant la croûte de la terre de 2,763, en moyenne, la présence d'une couche d'eau de mer doit diminuer dans une proportion sensible l'influence de la gravitation totale du globe sur un corps placé à sa surface, M. Siemens a reconnu que l'attraction, mesurée au-dessus de la mer et au-dessus de la terre, est sensiblement dans le rapport de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

h à $\frac{614}{519}$ R, plus simplement dans celui de h à R, h représentant la profondeur de la mer au point où l'on fait la mesure, R le rayon moyen de la terre. La diminution de poids d'un corps, à la surface de la mer, étant à peu près proportionnelle à la profondeur de l'eau, si ce corps est soutenu par un ressort, la diminution de la tension du ressort permettra d'apprécier la perte de poids et d'en déduire la profondeur de la mer.

M. Siemens a donné le nom de *bathomètre*, à l'appareil qu'il a construit d'après ce principe. Il consiste essentiellement en une colonne de mercure contenue dans un tube d'acier terminé à ses deux extrémités par des parties évasées en forme de coupes, de façon à augmenter la surface terminale du mercure. La coupe inférieure est fermée par un diaphragme en acier strié très mince, et le poids de la colonne de mercure est balancé au centre du diaphragme par la force élastique de quatre ressorts en spirale d'acier fortement trempé et de même longueur que la colonne de mercure. Le tube est suspendu un peu au-dessus de son centre de gravité, à l'aide d'un joint universel, de manière à conserver sa position verticale malgré les mouvements du navire ; les oscillations verticales de la colonne de mercure sont rendues presque insensibles par un étranglement du tube d'acier, à sa partie supérieure. La mesure des légères variations de longueur qu'éprouvent les ressorts, lorsque la pesanteur varie et détermine une augmentation ou une diminution de poids de la colonne de mercure, s'effectue à l'aide d'une vis micrométrique placée sous le diaphragme : un courant électrique indique avec précision l'instant de leur contact. Le pas de la vis et les divisions de sa circonférence sont calculés de telle sorte que chaque division corresponde à une brasse de profondeur de la mer.

Dans un autre modèle de cet instrument, la coupe supérieure est fermée par un couvercle percé d'un trou qui fait communiquer l'intérieur du tube d'acier avec un tube de verre ; ce dernier, d'environ 2 millimètres de diamètre intérieur, est enroulé en une spirale horizontale un peu au-dessus du couvercle et présente des divisions correspondant à des brasses de profondeur d'eau. Sur la surface du mercure on verse une certaine quantité d'eau qui, lorsque l'instrument est à terre, au niveau de la mer, doit affleurer en un point marqué zéro. Lorsque le bathomètre se trouve au-dessus d'une certaine masse d'eau, la pression du mercure sur le diaphragme diminuant, les ressorts d'acier forcent l'eau à pénétrer plus avant dans le tube de verre. Une graduation empirique faite avec des lignes de sonde donne la profondeur de la mer pour une pénétration déterminée du liquide dans le tube spiral.

Il est indispensable de faire une correction dépendant de la latitude du lieu de l'observation : elle est donnée par une table qui accuse des varia-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tions moindres sur mer que sur terre, ce qui est dû à l'absence des masses qui s'élèvent au-dessus du sol et à la densité très uniforme de la mer.

Cet appareil a été employé pendant la pose du câble atlantique direct de 1874, à bord du *Faraday*, concurremment avec les instruments de sondage ordinaires. L'accord a été aussi complet qu'on pouvait le désirer, en tenant compte du fait que la ligne de sonde donne la profondeur en un point situé immédiatement au-dessous du navire, tandis que le bathomètre donne la profondeur moyenne d'une certaine région, dont l'étendue dépend de la profondeur.

Le bathomètre a permis même au *Faraday* de retrouver le bout d'un câble, dans des eaux profondes, par la simple connaissance de la profondeur dans laquelle il avait été perdu. La position d'un navire, à défaut d'observations astronomiques directes qui peuvent être rendues impossibles par la brume ou d'autres circonstances, peut donc être déterminée approximativement par le bathomètre, pourvu que l'on ait soin de relever exactement les courbes de niveau du fond de la mer, tout autour du point où l'on se trouve.

§ 2. — TEMPÉRATURE DES EAUX DE LA MER. — CROISIÈRES SCIENTIFIQUES

Les nombreuses explorations que les besoins de la télégraphie sous-marine ont motivées dans presque toutes les mers du globe, ont fait augmenter dans une large proportion le nombre des sondages pris en mer profonde, et donné par suite une connaissance plus exacte du profil et de la nature du fond des mers. De véritables bancs même, qui avaient échappé précédemment à l'attention des navigateurs, ont été découverts dans ces explorations : c'est ainsi que la *Seine* a reconnu l'existence d'un banc de 100 brasses de profondeur, dans le voisinage immédiat de fonds de 2400 brasses, durant les opérations de pose du câble de Lisbonne à Madère. Le *Faraday* a de même trouvé, en 1879, un haut fond au milieu de l'Atlantique, et la *Dacia*, en 1883, un banc de 58 brasses de profondeur, à côté de fonds de 2000 brasses, entre Cadix et les îles Canaries.

D'un autre côté, les animaux sous-marins relevés sur le câble de la Sardaigne à Bône, en 1860, par M. Fleeming Jenkin, ont les premiers démontré l'existence, dans des eaux de plus de 1000 brasses de profondeur, d'organismes très développés.

Les connaissances dont la télégraphie sous-marine enrichissait ainsi incidemment la science pure, firent naître le désir de les développer, et engagèrent quelques gouvernements à organiser des expéditions scientifiques

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

spéciales ; ces expéditions, munies de moyens d'investigations perfectionnés, ont donné lieu à des découvertes du plus haut intérêt, tant dans le domaine de la physique générale du globe que dans celui des sciences naturelles. Les croisières du *Lightning* et du *Porcupine*, des îles Feroë au détroit de Gibraltar et dans la Méditerranée, de 1868 à 1870 ; du *Challenger* qui, dans une campagne de trois ans et demi, depuis le mois de décembre 1872 jusqu'au mois de mai 1876, parcourut 69000 milles dans l'Atlantique et le Pacifique et rapporta plus de 100000 échantillons d'organismes sous-marins, végétaux et animaux ; enfin du *Travailleur*, le long des côtes d'Espagne et du Portugal et dans le bassin occidental de la Méditerranée, en 1880 et 1881, sont restées célèbres entre toutes.

La température des eaux profondes de la mer, affectant directement les qualités électriques des matières qui constituent l'âme des câbles sous-marins, nous croyons devoir décrire sommairement les instruments employés dans ces explorations et donner un aperçu des résultats obtenus.

THERMOMÈTRES

Thermomètre Miller-Casella.

A bord du *Porcupine*, pendant sa croisière, en 1870, on employait des thermomètres à maxima et à minima de Six modifiés. Ces appareils consistaient (fig.220) en un tube de verre recourbé, terminé à l'une de ses extrémités par une boule et par un simple renflement à l'autre extrémité. La partie recourbée du tube contenait une colonne de mercure surmontée de deux petits curseurs en fer ; au-dessus se trouvait un mélange d'eau et de créosote qui remplissait entièrement la boule et, à moitié seulement, la partie renflée du tube. La boule était enfermée dans une enveloppe de verre soudée au tube, afin de soustraire l'instrument aux causes d'erreurs résultant de la compression du réservoir. Les trois quarts environ de l'espace compris entre la boule et son enveloppe étaient remplis d'alcool ; il restait au-dessus de ce liquide un petit vide suffisant pour empêcher le thermomètre lui-même d'être comprimé par suite de la diminution de volume que devait subir l'enveloppe extérieure, au fond de la mer. Le tout était contenu dans une boîte métallique percée à ses deux extrémités de trous pour le libre passage de l'eau (fig. 221). Ces instruments construits par M. Casella, d'après les indications du professeur Miller, soumis dans un appareil d'essai à une pression de 475 kilogrammes par centimètre carré, n'ont subi qu'une légère élévation de température, due, sans doute en partie, à la chaleur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

développée par la compression de l'eau ; deux d'entre eux ont fourni, sans se briser, à bord du *Porcupine*, 166 observations pour lesquelles ils ont parcouru plus de 160 kilomètres. Le Dr Carpenter les a toujours trouvés d'ac-

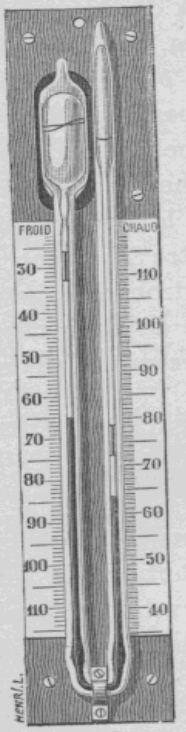


FIG. 220.

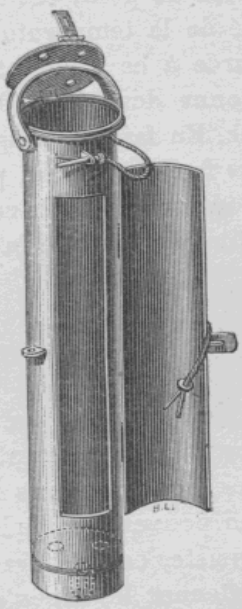


FIG. 221.

cord à une fraction de degré près et affirme que leurs indications étaient certainement exactes à 0,79 de degré près, approximation très suffisante pour ce genre d'observations.

Thermomètre Siemens.

Outre le thermomètre Miller-Casella, le *Challenger* avait emporté un instrument imaginé par sir C. W. Siemens, et qui repose sur la variation de la résistance électrique d'un conducteur métallique avec la température.

L'appareil se compose de deux fils fins de cuivre, recouverts de soie, de résistances exactement égales, enroulés en deux ou trois couches sur deux tubes de laiton ouverts à leurs extrémités et garantis extérieurement contre l'humidité par des enveloppes de caoutchouc. La bobine thermomètre est envoyée au fond de la mer, attachée à un câble léger comprenant deux conducteurs isolés l'un de l'autre : l'un des conducteurs est relié à l'une des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

extrémités du fil de la bobine, le second au tube de laiton à l'intérieur duquel est déjà soudée la deuxième extrémité de ce fil. La bobine de comparaison est plongée, à bord, dans un bain d'eau dont on peut faire varier la température à volonté. Les deux bobines formant deux des branches d'un pont de Wheatstone, si, à l'aide d'eau chaude ou glacée, on élève ou on abaisse la température du bain jusqu'à ce que l'équilibre électrique soit établi entre les résistances du pont, cet équilibre, indiqué par le galvanomètre, prouve l'uniformité de la température dans les deux bobines. La température du bain, mesurée à ce moment au moyen d'un thermomètre à mercure très sensible, donne donc immédiatement celle de la bobine qui est plongée dans la mer. En faisant usage d'un galvanomètre Thomson marin, dont il est toujours facile, avec un peu d'habitude, de trouver exactement le zéro, malgré les mouvements de roulis ou de tangage du navire, on peut obtenir la température du fond de la mer, avec une approximation de 1/10 de degré Fahrenheit.

Appareils enregistreurs Neumayer.

En 1873, le Dr Neumayer a présenté, à la Société géographique de Berlin, un appareil enregistrant, d'une manière continue la température, de manière à éviter les erreurs résultant de l'observation, à bord, d'index métalliques qui peuvent se déplacer pendant le relevage des instruments. Cet appareil consiste, essentiellement, en une caisse en laiton hermétiquement close et contenant les tiges de deux thermomètres à mercure verticaux, dont les réservoirs plongent dans un compartiment distinct, à l'intérieur duquel l'eau pénètre librement. En face des deux tiges se trouvent deux tubes de Geissler, contenant de l'azote et actionnés par quelques éléments de pile. Derrière les instruments sont placés deux petits cylindres ; l'un d'eux renferme un mouvement d'horlogerie et porte à l'extérieur une bande de papier photographique qui se déroule d'un mouvement uniforme pour s'enrouler, au fur et à mesure, sur le second cylindre. Dès que le circuit de la pile électrique est fermé, les tubes deviennent lumineux et projettent l'image de la partie vide des thermomètres sur la bande de papier sensibilisé. Il suffit donc de noter les temps auxquels l'appareil atteint des profondeurs déterminées pour connaître les températures correspondantes de l'eau.

Le Dr Neumayer a complété, plus tard, cet instrument en y ajoutant un dispositif pour l'enregistrement automatique de la direction des courants sous-marins. A cet effet, la partie supérieure de la caisse en laiton contient une aiguille aimantée fixée à un carton qui porte la rose des vents et qui peut tourner autour d'un axe vertical. Extérieurement à la caisse se trouve une sorte de moulinet dont l'axe horizontal est mobile autour du premier

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et se place dans la direction du courant, si le navire est au repos. L'angle formé par le moulinet et la ligne nord-sud de l'aimant peut être enregistré par un procédé photographique analogue à celui qui donne la mesure de la température.

Thermomètre enregistreur Michaëlis.

Le Dr Michaëlis, de Berlin, a imaginé en 1884 un appareil basé sur le même principe que le précédent, pour enregistrer automatiquement la température des eaux de la mer à diverses profondeurs. Cet appareil[1] se compose (fig. 222) d'une boîte en fonte A, très solide, fermée par un couvercle qui porte, venu de fonte, un fort anneau; à cet anneau est attaché le cordage qui soutient tout le système et dont l'âme est également formée de deux fils conducteurs isolés l'un de l'autre. Les deux fils sont reliés, à l'intérieur de la boîte et par l'intermédiaire de deux ressorts *a* et *b*, à une lampe à arc B et à un électro-aimant F; le circuit est complété, à l'instant voulu, à bord du navire, à travers une petite machine dynamo-électrique.

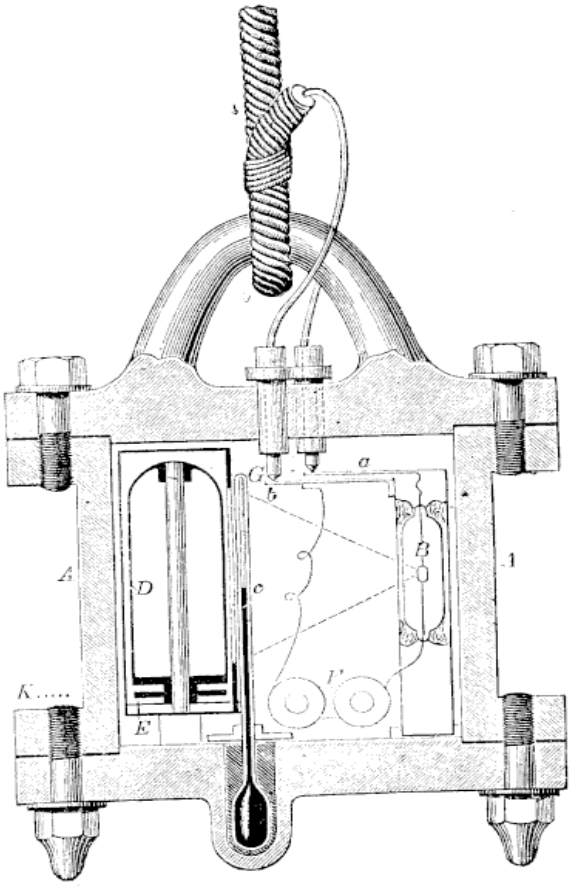


Fig. 222.

En face de la lampe se trouve un thermomètre à mercure C dont le réservoir pénètre dans une cavité formant saillie à l'extérieur de la boîte; cette cavité est remplie de mercure, pour permettre au thermomètre de prendre plus rapidement la température de l'eau dans laquelle l'appareil est plongé.

Un cylindre D, recouvert de papier photographique, est mobile autour d'un axe vertical en arrière du thermomètre : il est enveloppé d'un cylindre

[1] *Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie*, IIe année.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

annulaire E, fendu suivant une de ses génératrices et dans le prolongement du plan déterminé par la tige du thermomètre et par le foyer lumineux B. Le cylindre E est fixe ; le cylindre D est, au contraire, invariablement lié à une roue à rochet K qu'un échappement à ancre, porté par l'armature de l'électro-aimant F, fait avancer d'une dent à chaque émission de courant. Un ressort ramène l'armature à sa position antérieure dès que le circuit est rompu.

Lorsque l'appareil est arrivé à la profondeur demandée, indiquée par la longueur de cordage déroulé, et que le thermomètre s'est mis en équilibre de température avec l'eau ambiante, on lance à bord le courant dans le câble : la lampe B s'illumine et projette ses rayons sur le papier sensibilisé, à travers la fente du cylindre annulaire et la partie du tube du thermomètre que n'occupe pas la colonne mercurielle.

La roue K tournant de l'intervalle compris entre deux dents à chaque fermeture du circuit amène chaque fois, en regard de la fente du cylindre F, une portion encore intacte du papier chimique ; le nombre possible des observations, sans qu'il soit nécessaire de remonter l'appareil à bord, est donc égal à celui des dents de la roue K. Les observations peuvent d'ailleurs se succéder à des intervalles de temps aussi rapprochés que l'on veut, la durée de l'émission du courant nécessaire pour obtenir des traces bien apparentes sur le papier ne dépassant pas un quart de seconde. Le papier est traité à la manière ordinaire dès que l'appareil revient à bord du navire.

RÉSUMÉ DES OBSERVATIONS FAITES DANS LES PRINCIPALES CROISIÈRES

Bien que M. Depretz eût montré, dès 1833 [1], que l'eau de mer ne se congèle qu'à — 3°,67 C., et que cette même température correspond à son maximum de densité, on avait continué à admettre que la température de la mer, dans les grandes profondeurs, était uniformément de 4° C., qui est celle du maximum de densité de l'eau douce. Les observations du Dr Carpenter et de sir Wyville Thomson, à bord du *Lightning* en 1868, sont venues les premières rectifier cette erreur. Il est établi aujourd'hui que la température des eaux profondes de la mer, sous l'équateur comme dans les régions polaires, avoisine 0°, température de congélation de l'eau ordinaire. A la surface, la température varie entre des limites assez étendues suivant la latitude, la saison, la direction des vents et des courants : celle du Gulf-Stream, à sa sortie de la mer des Antilles, est de 27°,8.

Dans l'océan Atlantique, l'influence des causes extérieures ne s'étend

[1] *Annales de Chimie*, t. LXX, 1833. Recherches sur le maximum de densité des dissolutions aqueuses.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pas, en général, au delà de la profondeur de 50 brasses et on trouve une moyenne assez constante de 10° à 100 brasses de profondeur. Lorsque l'on descend de 100 à 500 brasses, la température s'abaisse de 10° à 8°,5 environ, et elle tombe de 8°,5 à 3°,5 lorsque l'on descend de 500 à 1 000 brasses. La température de 2 à 3° C. n'est atteinte qu'à 1 100 brasses, elle diminue ensuite assez régulièrement de 0°,3 par 250 brasses de profondeur [1].

La température des eaux de l'océan Pacifique est généralement un peu plus basse que celle des eaux de l'Atlantique : dans la partie nord du Pacifique, la température de 10° est atteinte à 200 brasses de profondeur ; celle de 2 à 3° à 700 brasses et le minimum de 1°,7 à 1 400 brasses : la température reste constante ensuite jusqu'au fond. De part et d'autre de l'équateur, sur une largeur de 20° en latitude, on trouve à la surface un courant portant à l'ouest, animé d'une vitesse de 40 à 70 milles par jour, et dont la température, dans les couches supérieures, s'élève jusqu'à 25° durant la belle saison ; à 4 ou 500 brasses de profondeur, elle tombe à 5° ; à 1 100 brasses, on atteint 3° ; un degré et une fraction sont perdus encore entre cette dernière profondeur et le fond.

Dans l'Atlantique, comme dans le Pacifique, les eaux sont refroidies par des courants venant des deux pôles, mais principalement du pôle sud. Cet effet provient d'une part de la circulation plus libre des eaux dans l'hémisphère austral, résultant de l'absence presque complète des terres dans sa partie la plus méridionale, et d'autre part de l'excès de la précipitation sur l'évaporation de l'eau dans ces régions.

Des effets inverses se produisent dans l'hémisphère boréal où les terres occupent une étendue bien plus considérable que les mers.

Entre Montevideo et les îles Falkland, des sondages ont donné 5° à 125 brasses, 2°,5 à 700 brasses, 2° à 1 100 brasses et 0°,4 à 2 425 brasses ; on rencontre même un minimum de — 0°,6 entre Montevideo et le méridien de Tristan d'Acunha [2]. Entre les îles Féroë et l'Ecosse, on constate d'un autre côté l'existence de deux masses nettement séparées et circulant l'une à côté de l'autre sans se mélanger, l'une d'eau chaude venant du sud, donnant 5°,9 à 767 brasses de profondeur, l'autre d'eau froide venant du nord, marquant — 1°,2 à 640 brasses de profondeur.

Dans le détroit de Davis, au milieu de sa largeur, le Dr Gwyn Jeffreys a obtenu, en 1875, 4°,5 à la surface et 1°,5 à 410 brasses de profondeur. Au cours de ce même voyage, il a trouvé à terre, sur le 83e parallèle, d'anciennes habitations abandonnées par les Esquimaux, qui lui ont fait con-

[1] Sir Wyville Thomson, *The depths of the sea*.

[2] Rapport de sir Wyville Thomson, sur les opérations du *Challenger*. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1876.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

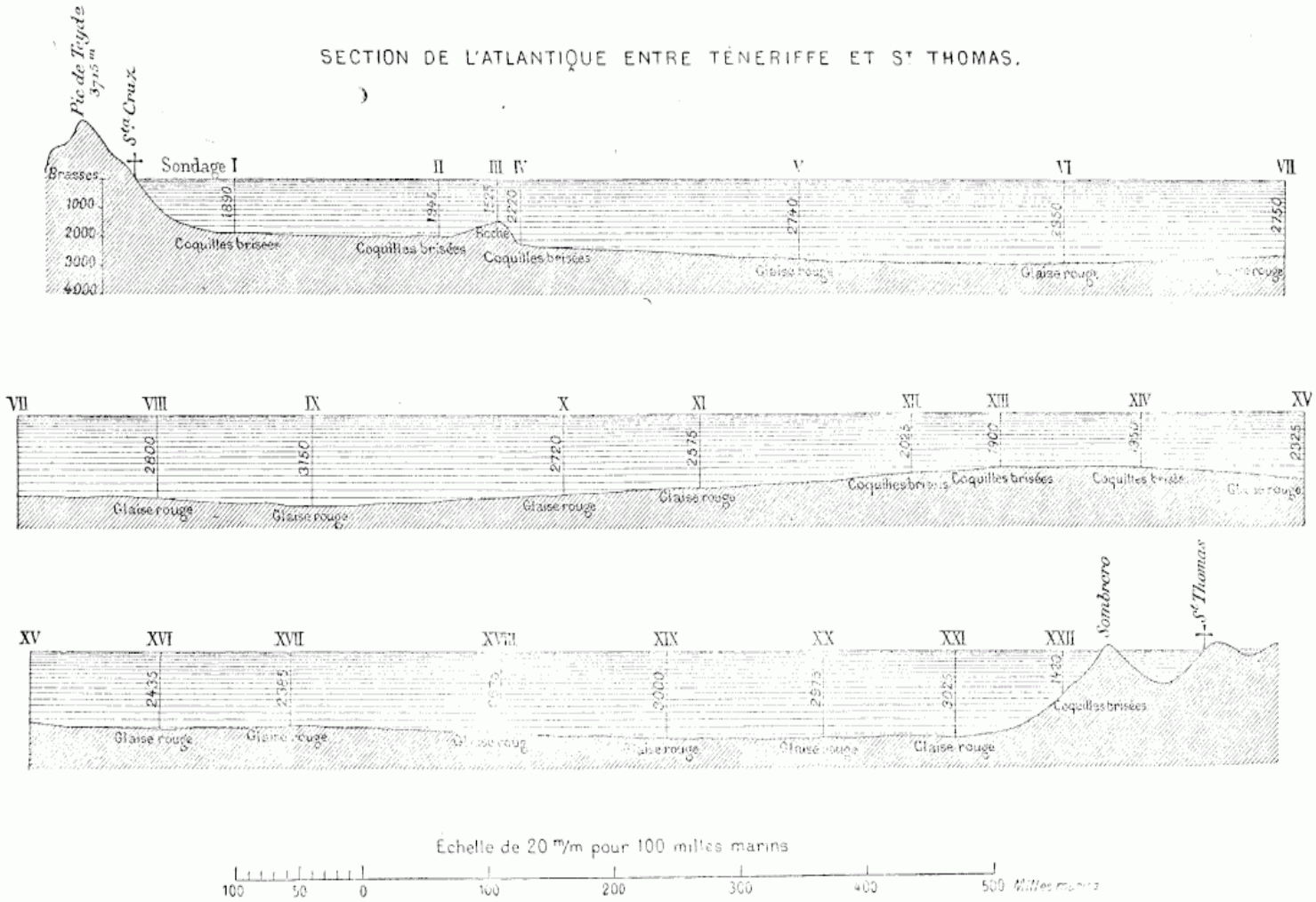


Fig. 223.

clure à un refroidissement du pôle nord, remontant à une époque peu éloignée[1].

Le mouvement de l'eau froide venant des pôles a d'ailleurs une vitesse excessivement faible. Les dépôts de coquilles microscopiques, dans lesquels les plombs de sonde s'enfoncent souvent de plus d'un mètre, seraient en effet balayés par des courants d'une certaine intensité ; d'un autre côté, lors des premiers sondages effectués par des navires américains dans de grandes profondeurs, la ligne de sonde entraînée par son propre poids se lovait sur elle-même autour du plomb un grand nombre de fois, preuve manifeste du calme de l'eau dans les couches profondes. Le navire *la Dacia*, au cours de la campagne de sondages qu'avait nécessité, en 1883, le long de la côte occidentale du Maroc, l'immersion du câble destiné à relier les îles Canaries à l'Espagne, a cependant reconnu la présence de courants rapides à plus de 1 000 brasses de profondeur[2]. Des fonds durs ont d'un autre côté été trouvés à de très grandes profondeurs, en plein océan : ils impliqueraient l'existence de courants sous-marins assez énergiques pour empêcher le dépôt des particules sédimenteuses en suspension dans l'eau, s'ils n'étaient pas dus à des formations madréporiques encore en activité; de nouvelles observations ne tarderont pas sans doute à éclaircir complètement ce point.

Dans le Pacifique, l'eau froide vient exclusivement du pôle antarctique. La seule communication de cet océan avec l'océan glacial Arctique se trouvant au détroit de Behring dont les fonds ne dépassent pas 40 brasses, celui-ci ne peut que livrer passage aux eaux chaudes se dirigeant vers le pôle nord, et barre le chemin aux eaux froides qui en descendent.

La plus grande profondeur que l'on ait rencontrée a été de 3 950 brasses, dans l'océan Pacifique, en un point situé à l'est de la grande île Népon du Japon, sur une ligne tirée entre Yokohama et Honolulu, capitale des îles Sandwich. Les fonds, sur cette ligne, sont en moyenne de 2 858 brasses et très réguliers. La profondeur du Pacifique augmente, en allant du sud au nord ; la différence moyenne entre les deux hémisphères est d'environ 1 000 brasses.

L'océan Atlantique est, en général, moins profond et plus accidenté que le Pacifique. Entre Ténériffe et Saint-Thomas (fig. 223), la profondeur moyenne est de 2 470 brasses, avec des écarts, en plus et en moins, de 600 brasses, sans compter un haut fonds de roches de 1 525 brasses, à 200 milles environ au large de Santa-Cruz[3].

Dans les mers fermées, comme la Méditerranée, la distribution de la température est absolument différente de ce qu'elle est dans les océans. La chute de la température est très rapide dans les 30 premières brasses, plus

[1] Expédition de la *Valeureuse* dans les mers polaires. *Proceedings of the Royal Society*, 1876.
[2] *Journal of the Society of telegraph Engineers and Electricians*. Vol. XVI, p. 509 et passim.
[3] Expédition du *Challenger*, loc. cit.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lente de 30 à 50 brasses ; de 50 à 100 brasses, la diminution de température n'est plus que de 3° C. et on atteint alors la température de 12°,8 C. environ, qui est, à quelques centièmes de degré près, celle de toute la masse d'eau inférieure, dans toute l'étendue de la Méditerranée. Comme exemple, nous citerons le sondage suivant :

à la surface.	28°,6 C.
à 10 brasses	20°,9
20 —	10°,6
30 —	17°,3
40 —	16°,7
50 —	15°,6
100 —	12°,8
386 —	12°,8

Ce résultat remarquable est corroboré par la mesure de la résistance des conducteurs des câbles immergés dans la Méditerranée, entre Marseille et Alger ou Bône, et entre Gibraltar, Malte et Alexandrie. La résistance du cuivre étant déterminée exactement lors de la fabrication des câbles à la température de 24° C., on déduit facilement de la mesure de cette même grandeur, après l'immersion, la température moyenne des eaux qui les baignent. Les câbles de Marseille à Alger et à Bône donnent ainsi une température moyenne de 13°,9, celui de Gibraltar à Malte 14°,5, celui de Bône à Malte 14°, ceux de Malte à Alexandrie 13°. Les différences que l'on remarque entre ces nombres et celui qui résulte des observations directes doivent être attribuées à la température plus élevée des eaux près des côtes : elles sont d'ailleurs sujettes à des variations de 1° à 1°,5, suivant la saison de l'année où l'on effectue les mesures. Les câbles de Malte à Alexandrie présentent toutefois une anomalie d'un genre particulier. Les hauts-fonds qui séparent la Sicile de la Tunisie divisent la Méditerranée en deux bassins bien distincts dont les eaux ne se mélangent qu'imparfaitement. Or, d'après les observations faites par le Dr Carpenter à bord du *Shearwater*, en 1874, la température du bassin occidental est un peu inférieure à celle du bassin oriental : le premier reçoit en effet, quoiqu'en proportion très limitée, les eaux plus froides de l'Atlantique par le détroit de Gibraltar ; le second est exposé aux vents brûlants d'Afrique dont la grande chaîne de l'Atlas garantit, au moins partiellement, le bassin occidental ; en outre, bien que recevant par le courant du Bosphore les eaux froides que le Don, le Danube et le Dniéper versent dans la mer Noire, il est alimenté surtout par les eaux chaudes du Nil.

On est donc conduit à supposer, en l'absence d'observations directes, que la température relativement basse des câbles d'Alexandrie est due à la masse locale d'eau froide, venant de la mer Noire et n'ayant pas encore pris la température moyenne de la Méditerranée, analogue à celle dont l'existence

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a été constatée dans le voisinage des îles Féroë. Les deux courants, inférieur d'eau froide de l'Atlantique dans la Méditerranée et supérieur d'eau chaude de la Méditerranée dans l'Atlantique, par le détroit de Gilbraltar, suffisent à maintenir constante la salinité[1] de cette mer, mais ne peuvent produire de mouvements au-dessous de 500 brasses, limite des profondeurs dans ces parages ; la masse des eaux de la Méditerranée qui, dans les grands fonds, atteint 1500 brasses de profondeur, se trouve ainsi à l'abri des courants horizontaux. L'échauffement des couches supérieures par la radiation solaire l'empêche, d'un autre côté, d'être soumise à la circulation verticale qui se manifeste, dans les grands bassins océaniques, entre les eaux polaires et équatoriales par suite de la différence de leurs températures.

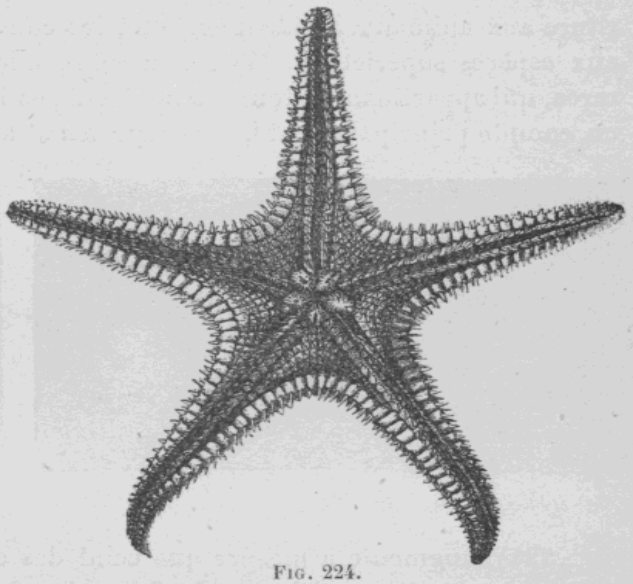


FIG. 224.

La lumière solaire, si on en juge d'après quelques expériences faites avec du papier photographique très sensible, ne pénètre pas dans la mer au delà d'un petit nombre de brasses en laissant toute la masse d'eau inférieure dans une obscurité profonde. Il serait possible, cependant, que quelques rayons d'une nature toute particulière pussent arriver plus loin ; mais l'eau de mer, même la plus claire, tenant toujours en suspension des particules opaques et des organismes flottants microscopiques, finit par absorber toutes les radiations, plus rapidement même qu'une solution saline parfaitement pure[2]. Dans tous les cas, les végétaux deviennent très rares au-dessous de 50 brasses et disparaissent entièrement au-dessous de 200 brasses. Le long

[1] Les eaux de la Méditerranée sont plus salées que celles de l'Atlantique ; ces dernières ont, entre les profondeurs de 77 à 2090 brasses, des densités variant de 1,02607 à 1,0283, et en moyenne de 1, 0277. La densité des eaux de la Méditerranée est en général supérieure à 1,029 ; le maximum 1,02964 a été rencontré au large de Nice. Le degré de salure et la densité des eaux à la surface sont ordinairement moindres que ceux des eaux inférieures. — (*Archives des missions scientifiques et littéraires*, 3e série, t. VII. Rapport de M. Alphonse Milne-Edwards.)

[2] L'existence d'une paire d'yeux bien développés dans une espèce de *Pleurotoma*, mollusque pêché à plus de 2000 brasses de profondeur, ne permet pas de douter que la mer ne soit éclairée à toutes profondeurs. Les rayons du soleil n'y pouvant pénétrer, on peut supposer que cette illumination est due aux lueurs phosphorescentes émises par certains animaux sous-marins.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des côtes, jusqu'à ces limites de profondeur, dans les climats tempérés et tropicaux, la flore sous-marine est luxuriante et accompagnée d'une faune également riche. A terre, au fur et à mesure que l'on s'élève sur les hauteurs, la vie végétale et la vie animale s'éteignent graduellement. Dans la mer, à mesure que l'on s'éloigne de la surface pour s'enfoncer plus avant dans ses profondeurs, le nombre des espèces animales diminue ; l'augmentation de la pression et l'abaissement de la température, joints à l'absence de la lumière solaire et par suite à celle des végétaux qui servent de nourriture aux animaux, rendent en effet les conditions de la vie plus difficiles aux espèces supérieures. Mais le nombre d'individus de ces espèces plus rares, qui appartiennent toutes à la classe des invertébrés et parmi lesquelles on compte principalement les *Astropecten* et les *Archaster* ou *Etoiles de mer*

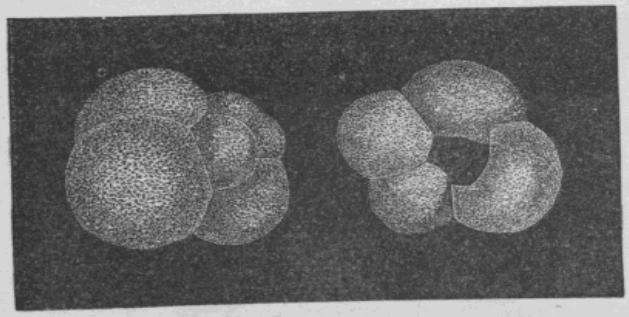


Fig. 225.

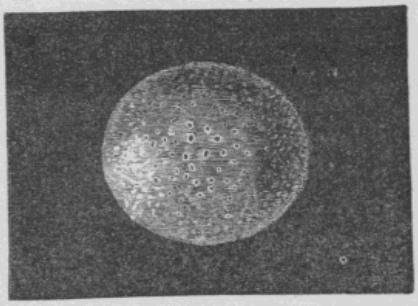


Fig. 226.

(fig. 224), augmente à mesure que celui des espèces animales diminue, de telle sorte que les grandes profondeurs des Océans sont en définitive aussi peuplées que leur surface.

En suspension dans l'eau, vivent en outre des quantités innombrables de *Foraminifères*, appartenant à deux espèces principales, *Globigerina bulloïdes* (fig. 225) et *Orbulina universa* (fig. 226), dont les coquilles microscopiques, tombées au fond de la mer après la mort de l'animal, forment ces immenses dépôts calcaires, appelés *Ooze*, que l'on trouve en larges bancs au fond de l'Atlantique comme du Pacifique et qui semblent avoir été préparés tout exprès pour recevoir les câbles sous-marins.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE IX

IMMERSION DES CABLES SOUS-MARINS

§ 1er. — Généralités.
§ 2. — Pose des câbles d'atterrissement.
§ 3. — Théorie mécanique de l'immersion des câbles.
§ 4. — Immersion des câbles de grands fonds.

§ 1er. — GÉNÉRALITÉS

Le tracé général du câble à immerger étant déterminé par la position des pays ou des villes que l'on désire relier ensemble, la configuration générale de la mer entre ces points, la nature des fonds, etc., renseignements que l'on tire, lorsqu'ils existent, des cartes marines, on arrête, préalablement à toute autre opération, les deux points d'atterrisage. Ces points sont choisis dans les parages où doit aboutir le câble, de telle sorte que celui-ci soit placé en dehors des mouillages habituels des navires, et repose sur un lit de sable ou de vase se raccordant en pente douce avec les grands fonds. Une baie bien abritée est à tous égards préférable; si l'on est obligé d'atterrir en pleine côte, il convient, autant que possible, d'en choisir une partie qui soit à peu près normale à la direction des vents régnants ; le câble se trouve exposé ainsi à un moindre ragage que lorsque la mer le saisit par le travers.

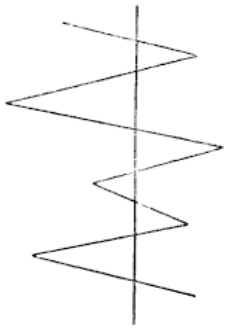


Fig. 227.

Une reconnaissance en bateau avec un pilote expérimenté du pays et une série de sondage faits à proximité de la ligne que l'on projette de suivre, sont généralement nécessaires pour arrêter définitivement le tracé à chacun des atterrissements.

On sonde, avant l'immersion, toute la longueur de la ligne que doit suivre le câble entre les deux atterrissements, quelque multipliés que puissent être les renseignements fournis par les cartes marines. Ces sondages doivent être pris à un intervalle de dix milles au plus les uns des autres. Ordinairement,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on sonde par échelons, c'est-à-dire que le navire parcourt (fig. 227) une ligne brisée dont le tracé projeté du câble forme l'axe, et on sonde au sommet de chacun des angles de la ligne. On obtient ainsi une connaissance plus exacte de la forme du terrain et on a plus de chances de découvrir les vallées sous-marines profondes, et les hauts-fonds accidentels au-dessus desquels une portion plus ou moins longue du câble pourrait se trouver suspendue, d'où résulterait presque inévitablement une rupture ultérieure du câble.

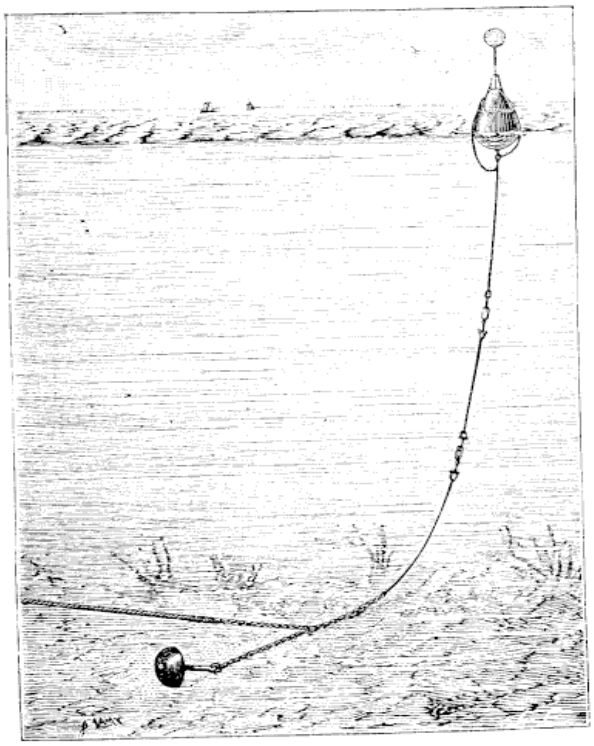


Fig. 228.

On évite souvent le surcroît de dépenses qu'entraînent ces sondages en en chargeant le navire même qui doit procéder à l'immersion du câble. Il se rend à l'une des extrémités de la ligne, et place le câble d'atterrissement dont le bout immergé est relié à une bouée (fig. 228). Il se dirige ensuite, en effectuant ses sondages, vers l'extrémité opposée de la ligne, et après avoir posé le second câble d'atterrissement, procède sans interruption à l'immersion de la section principale ; le bout en est raccordé ensuite à celui du câble laissé sur la bouée.

A chaque extrémité, le câble aboutit à une guérite ou maisonnette dans laquelle il est relié à la ligne souterraine qui le prolonge jusqu'au bureau télégraphique voisin. Dans cette maisonnette se font les expériences périodiques destinées à constater l'état électrique du câble, et, en cas d'avarie, celles ayant pour objet de localiser la position du défaut.

§ 2. — POSE DES CABLES D'ATTERRISSEMENT

Le navire mouille en face et aussi près que possible de la guérite, sur le tracé déjà déterminé du câble d'atterrissement ; il vire de bord pour présen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ter l'arrière à terre, et se maintient à peu près dans cette position en mouillant, à l'arrière, s'il en est besoin, une ancre à jet. Une embarcation s'en détache et se dirige vers la guérite en suivant exactement le tracé du câble ; elle emporte le bout d'une ligne de sonde en chanvre que l'on déroule à bord du navire : ce bout est porté jusqu'à la guérite même, le long de la tranchée que l'on ouvre sur un mètre de profondeur au moins entre cette guérite et la limite des plus basses eaux. La longueur de ligne déroulée, augmentée de 5 p. 100 et d'une constante de 10 brasses environ, donne la longueur du câble à immerger entre le navire et la guérite. Après avoir amené à l'arrière du navire le bout du câble d'atterrissement, on en love quelques grands tours d'abord sur un radeau formé de pièces de charpente en bois et allégé à l'aide de sacs en caoutchouc remplis d'air. Le reste de la longueur reconnue nécessaire est lové sur une plate-forme en bois qui recouvre deux bateaux plats accouplés à l'aide de quelques poutres transversales : un intervalle de 3 à 4 brasses sépare le radeau des bateaux accouplés. On dispose à l'arrière de la plate-forme un frein composé de deux pièces de bois, l'une horizontale A B, fixe (fig. 229), l'autre C D mobile autour d'un axe X ; le câble, maintenu entre deux guides E et F, est serré entre les deux pièces de bois, si l'on pèse à l'extrémité D du levier mobile C D ; sa vitesse de déroulement, au-dessus de fonds qui ne dépassent jamais une dizaine de brasses, peut donc être modérée à volonté.

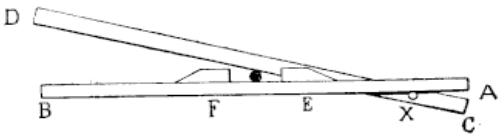


Fig. 229.

Pendant le lovage du câble sur les deux plates-formes, une embarcation déroule entre le navire et la guérite un cordage à la fois solide et léger pouvant flotter assez longtemps sur l'eau : la sparterie convient très bien à cet effet. L'extrémité de ce cordage est amarrée à terre à un champignon solidement planté dans le fond de la tranchée. Pour empêcher la corde de dévier à droite ou à gauche, on la relie de distance en distance par des bouts de cordage à de petits grappins que l'on mouille au fur et à mesure du déroulement de la corde.

Si le tracé du câble d'atterrissement doit former un coude, on laisse tomber un fort grappin ou champignon D un peu au delà du sommet A de l'angle déterminé par les deux directions A B, A C du cordage (fig. 230) et dans le prolongement de la ligne A B aboutissant au navire.

Un canot bien armé se place à quelques brasses en avant du radeau auquel il donne la remorque ; il se hale lui-même à bras sur la corde qui a été élongée entre le navire et la guérite. Un canot à vapeur, si on en a un à sa disposition, facilite l'opération en remorquant lui-même soit l'embarcation qui se trouve en tête de la flottille, soit les deux bateaux accouplés, dans le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cas où ceux-ci, drossés par le vent ou les courants, tendraient à s'écarter de la route qu'ils doivent suivre. Sur la plate-forme de ces bateaux se trouvent quelques hommes très exercés aux manœuvres de câbles, qui soulèvent, au fur et à mesure, les différentes loves et les retournent pour les laisser filer sans torsion à la mer; un homme est spécialement préposé à la manœuvre du frein et veille à ce que le câble se dépose sans tension, mais en ligne droite et sans former de boucles, sur le fond de la mer.

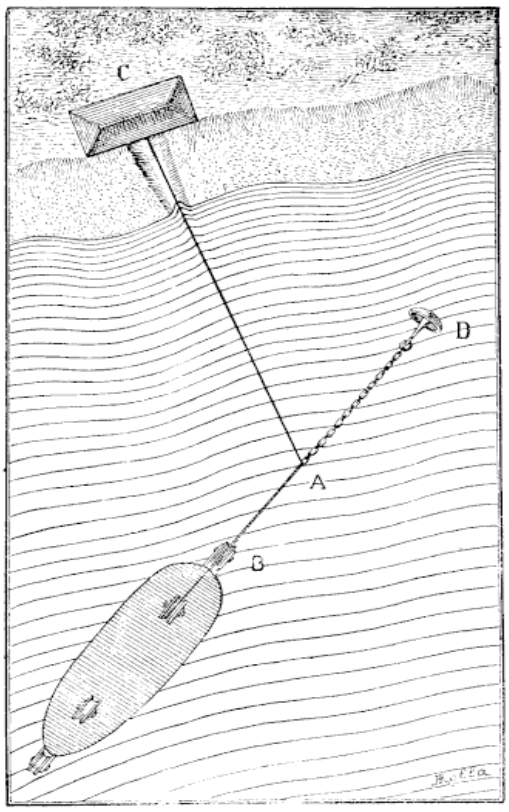


FIG.230.

Le câble est déroulé de la même manière du radeau lorsque l'approvisionnement qui existait sur les bateaux accouplés est épuisé : on ne fait plus usage du frein, le peu de profondeur de l'eau permettant de tirer le câble à volonté. Le canot remorqueur abandonne la remorque dès qu'il touche le fond; les hommes sautent dans l'eau et halent à terre le radeau. Le câble qui y reste est déroulé et placé dans la tranchée et le bout amené dans la guérite, à travers une ouverture qu'on a eu soin de pratiquer dans la maçonnerie. Ce bout doit être assez long pour que le conducteur en cuivre puisse être amené jusqu'aux appareils de mesures sans fil de secours intermédiaire. A cet effet, on coupe ordinairement les fils de l'armature sur une longueur de 1 ou 2 brasses et on conserve l'âme recouverte seulement de son enveloppe de chanvre; cette partie du câble étant très flexible peut être dirigée facilement sur tous les points de la table d'expériences.

La tranchée est remblayée avec une première couche de sable fin bien pilonné, d'une épaisseur de 20 à 25 centimètres, par-dessus laquelle on peut jeter des galets, entremêlés de quelques grosses pierres pour empêcher la mer, dans les parties basses où elle a accès, de la déchausser et de mettre ainsi le câble à découvert ; celui-ci, sous l'influence alternative de la mer et du soleil, ne tarderait pas à être mis hors de service. Il est indispensable même de faire vérifier de temps à autre les atterrissements et de faire enfouir profondément le câble, s'il tend à se découvrir. Quelquefois, on l'amarre à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'aide de fils de fer à des pieux que l'on enfonce dans la tranchée ou même dans la mer, si le câble est exposé à être traîné transversalement et porté sur des roches. Dans ce cas, les pieux armés de pointes en fer à leur partie inférieure, et cerclés à leur partie supérieure, sont disposés alternativement à droite et à gauche du câble et enfoncés à coups de maillets ou de sonnettes.

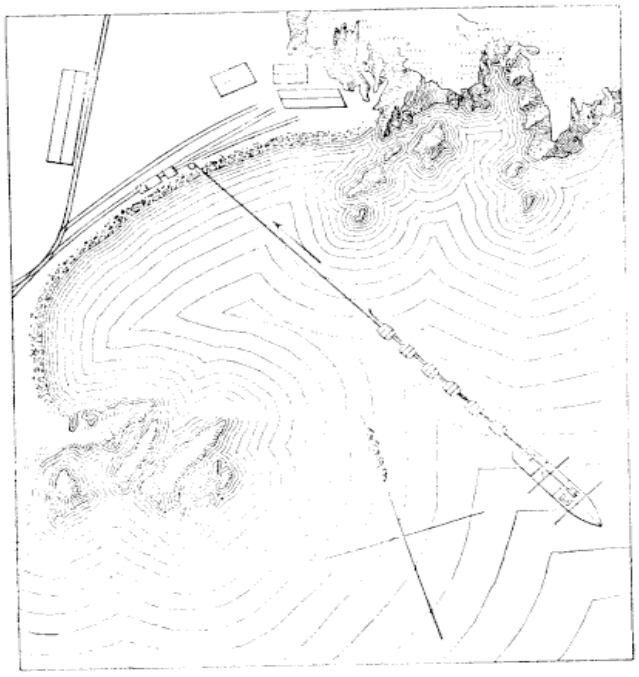


Fig. 231.

Quelquefois on ne pose le second atterrissement qu'après l'immersion de la section principale de la ligne. La longueur de câble à porter jusqu'à la guérite est alors enroulée d'abord sur le pont, à l'arrière du navire; on le sépare par un coup de hache de la partie restant dans la cuve, et le bout en étant ainsi devenu libre, on procède au lovage de cette pièce sur la plate-forme et le radeau, comme il a été expliqué plus haut.

Lorsque le câble d'atterrissement est très gros, il est difficile de le lover en tours à petit rayon sur des bateaux ou radeaux; la mise à l'eau de chaque tour peut en outre présenter des dangers pour les hommes chargés de la manœuvre, par suite de la rapidité avec laquelle son poids, qui est considérable, l'entraîne au fond de l'eau. Il est préférable, dans ce cas, de procéder de la manière suivante : le bateau qui doit se haler sur le cordage posé entre le navire et la guérite prend à son bord le bout du câble et l'y amarre solidement. Il s'avance ensuite vers la guérite en tirant derrière lui le câble

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que l'on déroule au fur et à mesure à bord du navire. Pour l'empêcher de traîner sur le fond, d'où résulterait un frottement impossible à vaincre, de 20 en 20 brasses environ, un autre bateau engage le câble, près du navire, dans le double d'une corde dont les deux bouts sont amarrés à l'embarcation; il fait route ensuite avec lui vers la guérite. Lorsqu'une longueur suffisante en est arrivée à terre, à un signal déterminé, chaque canot lâche le câble qui tombe partout en même temps au fond de la mer où il s'étend en ligne droite, sans avoir même la possibilité d'y former une boucle et sans avoir aucunement souffert pendant l'opération.

Lorsque le tirage est trop pénible pour le canot remorqueur, le cordage qui aboutit à la guérite, au lieu d'être fixé au fond de la tranchée, est tiré par des chevaux ou des bœufs. Sur les côtes du Pérou et du Chili, on a pu utiliser (fig. 231) la locomotive d'un chemin de fer qui passait dans le voisinage des lieux d'atterrissage.

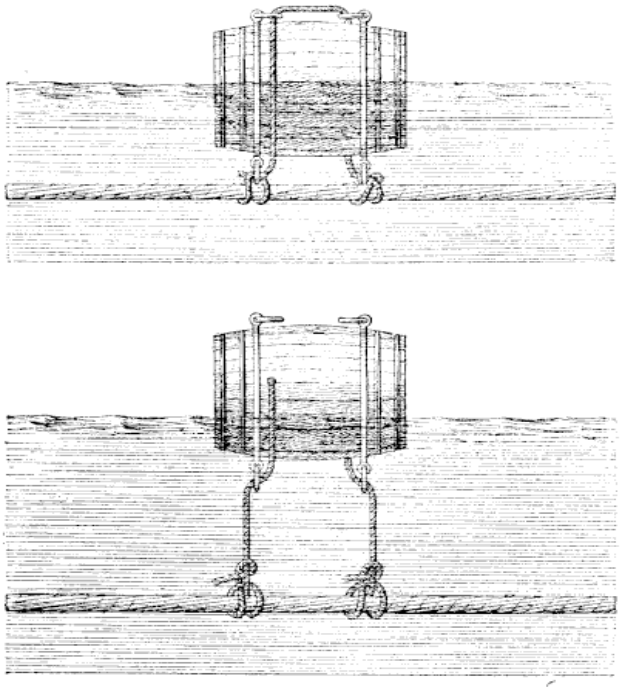


Fig. 232.

Ce genre d'opérations nécessitant une grande quantité de bateaux qui ne sont pas toujours disponibles au moment et au point où on pose un atterrissement, le ressac de la mer rendant en outre des plus dangereux l'accostage de certaines côtes par des embarcations, M. Robert K. Gray a eu l'idée de soutenir le câble de distance en distance par des barriques vides portant dans un même plan diamétral quatre anneaux en fer. On amarre le câble (fig. 232), à sa sortie du navire, à l'aide de cordelettes en jute ou en chanvre, aux barriques par l'intermédiaire de ces anneaux, en espaçant ces flotteurs à des intervalles de 5 à 10 brasses suivant le poids du câble. Lorsque celui-ci est arrivé à la guérite, un homme, dans une embarcation, coupe successivement les cordes qui retiennent les barriques; le câble tombe au fond et les futailles sont ramenées à bord. Les cordelettes sont d'ailleurs assez peu résistantes pour qu'elles soient coupées par leur ragage contre les anneaux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en fer au bout de quelques heures, pour le cas où, par suite de circonstances spéciales, on se trouverait dans l'impossibilité de libérer le câble. Les barriques iraient s'échouer à la côte où on en retrouverait la majeure partie.

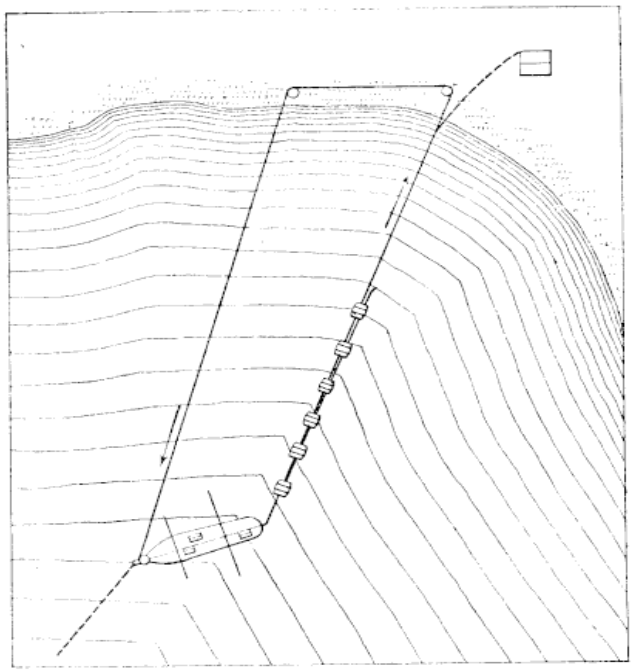


Fig. 233.

M. Robert K. Gray a remplacé, depuis, ces barriques qui encombraient la cale des navires par des ballons en caoutchouc recouverts de toile à voile, et munis d'une tubulure en cuivre, avec robinet permettant de les visser sur le tuyau d'une pompe à air. Au moment de s'en servir, les ballons sont gonflés et deviennent ainsi d'excellents flotteurs; lorsque l'opération est terminée, on en laisse échapper l'air et les ballons aplatis n'occupent plus qu'un espace insignifiant.

Lorsqu'on ne peut faire haler à terre commodément le cordage qui est frappé sur le bout du câble et que le tambour de pose peut être actionné par une machine à vapeur, on installe dans le voisinage de la guérite, et à 3 ou 400 mètres plus loin, sur le bord de la mer, deux poulies horizontales, (fig. 233); des champignons enfoncés profondément dans le sable de la plage, retiennent solidement ces poulies dans leur position. Le cordage qui était fixé à terre ou tiré par des animaux ou des machines, passe successivement dans les deux poulies, et revient à l'avant du navire où il s'enroule sur le tambour de la machine de relèvement. Celle-ci hale le cordage à bord, pen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dant que la machine de pose dévire le câble dont l'extrémité est fixée au bout du cordage qui se dirige vers la guérite. Le câble est d'ailleurs soutenu comme précédemment, de distance en distance, par des barriques ou des ballons pleins d'air. On arrive de la sorte à poser un câble dans une direction sensiblement droite, malgré le ressac ou des courants contraires; mais il est nécessaire que la distance du navire à la terre ne dépasse pas un demi-mille environ.

La durée moyenne de ces opérations est de 4 ou 5 heures.

§ 3. — THÉORIE MÉCANIQUE DE L'IMMERSION DES CABLES

La forme de la courbe prise par un câble, pendant sa descente au fond de la mer, et les différentes tensions auxquelles il est soumis, dans les conditions variées qui peuvent se présenter durant son immersion, ont été déterminées d'abord par sir W. Thomson qui publia, au mois d'octobre 1857, les résultats auxquels il était arrivé. Au mois de février 1858, MM. Longridge et Brooks lurent à l'*Institut des ingénieurs civils* de Londres un mémoire dans lequel la théorie de l'immersion des câbles était soumise à une analyse mathématique complète. Les conclusions de leur travail furent acceptées sans difficulté et appliquées pendant une quinzaine d'années; mais en 1874, le docteur Werner Siemens présenta à l'*Académie des Sciences* de Berlin une théorie nouvelle basée sur une loi physique différente. S'appuyant sur les expériences faites en 1848 par le colonel Beaufoy, MM. Longridge et Brooks avaient admis que la résistance opposée par l'eau au mouvement d'un cylindre glissant le long de son axe, était proportionnelle au carré de la vitesse du cylindre. M. Siemens, fort de l'autorité de Newton, de Coulomb, des expériences de Poiseuille sur le mouvement des liquides dans les tubes capillaires[1] et de ses propres expériences, estima que la résistance de l'eau au mouvement d'un cylindre de très petit diamètre relativement à sa longueur, et glissant le long de son axe, était au contraire simplement proportionnelle à la vitesse du cylindre. Il avait, en effet, constaté en 1857, d'une part, qu'en tirant à travers une mer parfaitement calme une ligne de sonde attachée sur le navire à un dynamomètre à ressort, la résistance de l'eau, mesurée au dynamomètre, était directement proportionnelle à la vitesse du navire mesurée au loch. D'autres expériences faites en 1856 sur les tubes du service pneumatique à Berlin, avaient démontré à M. Siemens qu'avec des tuyaux à large section et des vitesses d'eau considérables, la

[1] *Mémoires des savants étrangers à l'Académie des sciences*, vol. IX.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

loi est plus complexe et doit être représentée, ainsi que l'avait annoncé précédemment Hagenbach [1], par une expression de la forme.

$$a\,v + b\,v^2$$

v étant la vitesse relative des deux corps, a et b des constantes, dont la seconde est faible et rend le terme $b\,v^2$ négligeable pour des valeurs de v ne dépassant pas certaines limites.

La loi posée par par MM. Longridge et Brooks ne reposant sur aucune

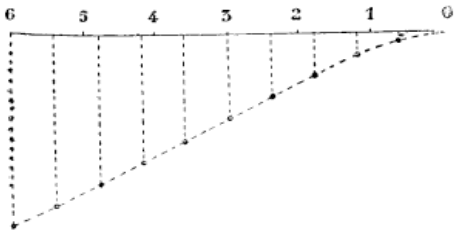


FIG. 234.

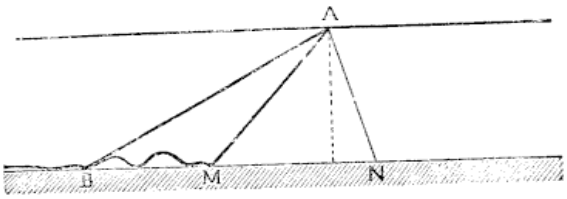


FIG. 235.

expérience directe, puisque les nombres trouvés par Beaufoy n'atteignent pas la seconde puissance de la vitesse, et varient seulement entre 1,8 et 1,947, nous admettrons, avec le Dr W. Siemens, dans ce qui suivra, la loi de la simple proportionnalité de la résistance de l'eau à la vitesse longitudinale du câble, pour les conditions de marche des navires ordinairement en usage.

Lorsque le câble se meut perpendiculairement à sa longueur, l'eau, en outre du frottement qu'elle exerce à la surface du câble, est obligée de se déplacer : la résistance qu'elle oppose dans ce cas au mouvement du câble a été considérée par tous les auteurs comme proportionnelle au carré de la vitesse du câble dans cette direction.

Cela posé, nous allons montrer que la forme prise, pendant sa descente dans l'eau, par un câble qui est posé sans tension au fond de la mer, est, si le navire se meut avec une vitesse uniforme, très sensiblement une ligne droite. Supposons, en effet, que, du navire on laisse tomber (fig 234), à des intervalles de temps égaux, des billes de diamètres égaux et ayant la même densité que le câble; le mouvement de chacune de ces billes dans le sens vertical, par suite de la résistance que l'eau lui opposera, deviendra très rapidement uniforme (une bille de mêmes diamètre et densité que le premier câble atlantique, acquerrait dans l'eau, au bout de 6/10 de seconde, une vitesse verticale de 0,9988 mètre, ne différant de sa vitesse définitive que de 1/3000). Les centres de ces billes parcourant des lignes verticales égale-

[1] *Annales de Poggendorff*, vol. CIX.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment espacées et les chemins décrits étant proportionnels aux distances respectives de ces lignes au navire, les centres des billes se trouveront, à un instant quelconque, sur une ligne à peu près droite, placée obliquement entre la surface et le fond de la mer et dont l'inclinaison ne dépendra que de la vitesse du navire. Si l'on réunit maintenant les centres des billes par un fil infiniment mince, auquel l'eau ne puisse opposer aucune résistance, on formera une sorte de câble qui pourra être posé sans aucune tension, et dont le mou dépendra uniquement de son inclinaison et par suite de la vitesse du navire. La partie suspendue dans l'eau d'un câble sous-marin, pendant son immersion, étant très flexible en raison de sa grande longueur, peut être considérée comme composée de petits éléments indépendants les uns des autres : chacun de ces éléments repose sur une sorte de plan incliné formé par la couche d'eau immédiatement en contact avec lui, et se trouve par suite sollicité dans une certaine direction de sens contraire à celle de la marche du navire, au lieu de tomber verticalement comme une bille. Ainsi, l'élément A (fig. 235) au lieu de venir en un point N tel que B N = B A, arrivera en un point intermédiaire M et toute la longueur du câble A B sera déposée entre les points B et M, suivant une ligne plus ou moins tortueuse.

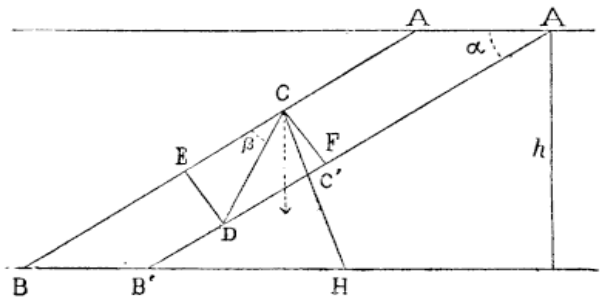


Fig. 236.

$$\frac{A\,B - B\,M}{B\,M}$$

exprimé en centièmes, représentera la perte ou le *mou* du câble.

Soit donc A′ B′ (fig. 236), la nouvelle position qu'occupera, au bout de l'unité de temps, la partie du câble en suspension dans l'eau, A′ A′ représentant le chemin parcouru par le navire pendant ce temps, et par suite sa vitesse. Un point quelconque C de A B, au lieu de venir au point C′ déterminé par l'intersection de A′ B′ avec la ligne C H telle que B H = B C, viendra en D en suivant la ligne C D. Si nous décomposons le déplacement C D en deux, l'un C E parallèle, l'autre C F perpendiculaire à la direction du câble, C′ D représentera l'excès de câble dépensé dans l'unité de temps et par suite $\frac{C'\,D}{A'\,A'}$ le mou.

Désignons maintenant par :

α l'angle formé par la ligne d'immersion du câble avec l'horizon :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

β l'angle formé par cette même ligne d'immersion avec la direction suivie par chaque élément du câble, pendant sa descente dans l'eau ;

f la force avec laquelle le frein retient le câble à bord ;

h la profondeur de la mer au point où le câble touche le fond ;

l la longueur de câble suspendue en ligne droite dans l'eau ;

m le mou ;

p le poids, dans l'eau, de l'unité de longueur du câble ;

q le coefficient de frottement longitudinal de l'eau sur le câble, ou la résistance que ce liquide oppose au mouvement du câble dans le sens de sa longueur, pour l'unité de vitesse et par unité de longueur ;

r le coefficient de frottement, y compris la résistance au déplacement de l'eau, lorsque le mouvement s'effectue dans une direction perpendiculaire à la longueur du câble, ou la résistance totale opposée par l'eau à ce mouvement pour l'unité de vitesse et par unité de longueur ;

t la vitesse constante avec laquelle le câble tombe dans l'eau lorsque son axe est vertical ;

u la vitesse de sa chute lorsque son axe est horizontal ;

v la vitesse constante du navire.

t et u sont, ainsi que le poids p, des constantes spéciales à chaque câble, et qui sont déterminées par expérience avant l'immersion ; elles sont liées aux coefficients de frottement q et r par les deux relations suivantes, obtenues en supposant que l'unité de longueur du câble tombe dans l'eau, soit avec son axe vertical

$$p = q\,t \tag{1}$$

soit avec son axe horizontal

$$p = r\,u^2 \tag{2}$$

Nous pouvons décomposer le poids pl du câble en deux forces, l'une $pl \sin \alpha$ dirigée suivant son axe C B et de sens contraire au frottement longitudinal de l'eau et à la retenue du frein, l'autre $pl \cos \alpha$ dirigée suivant C F, perpendiculaire à son axe et de sens contraire au frottement transversal et au déplacement de l'eau. Le mouvement du câble étant uniforme, toutes ces forces doivent se faire équilibre ; nous aurons donc les deux équations

$$p\,l \sin \alpha - q \times \mathrm{C\,E} \times l - f = 0 \tag{3}$$

$$p\,l \cos \alpha - r \times \overline{\mathrm{C\,F}}^2 \times l = 0 \tag{4}$$

Si dans la seconde de ces équations on remplace C F par sa valeur

$$\mathrm{C\,F} = v \sin \alpha$$

p par celle tirée de (2) il vient

$$\cos^2 \alpha + \frac{u^2}{v^2} \cos \alpha - 1 = 0 \tag{5}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'où l'on tire

$$\cos\alpha = -\frac{u^2}{2v^2} + \sqrt{1 + \frac{u^2}{4v^2}} \qquad (6)$$

en négligeant le signe — devant le radical, l'angle α étant nécessairement plus petit que 90° et par suite son cosinus positif.

Si on résout l'équation (5) par rapport à $\frac{u}{v}$, on a

$$\frac{u}{v} = \frac{\sin\alpha}{\sqrt{\cos\alpha}} = \operatorname{tang}\alpha\sqrt{\cos\alpha} \qquad (7)$$

Mais le triangle CBH étant isocèle, l'angle $BCH = 90° - \frac{\alpha}{2}$ et, puisque BCF est droit, l'angle $C'CF = \frac{\alpha}{2}$. Or

$$C\,E = F\,C + C'\,D = v\sin\alpha\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} + m\,v$$

Substituant cette valeur dans (3) et remarquant que

$$h = l\sin\alpha$$

on obtient

$$f = p\,h - \frac{v}{l}\,p\,h\left(\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} + \frac{m}{\sin\alpha}\right) \qquad (8)$$

On voit que si $v = o$, c'est-à-dire si le navire, pour une raison quelconque, est obligé de stopper pendant l'immersion, la force à laquelle devra faire équilibre le frein acquerra, à ce moment, sa valeur maximum ph, poids dans l'eau de la longueur de câble qui pendrait verticalement du navire jusqu'au fond de la mer. Cette valeur ph est aussi celle vers laquelle tend la retenue f du frein, lorsque le navire est animé d'une vitesse suffisamment grande, et que le câble est immergé sans mou.

Les deux termes qui, en dehors de ces circonstances particulières, doivent être retranchés de la valeur maximum ph et que nous désignerons par Q et R

$$Q = \frac{v}{l}\,p\,h\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} \qquad (9)$$

$$R = \frac{v}{l}\,p\,h\,\frac{m}{\sin\alpha} \qquad (10)$$

peuvent aussi, en identifiant les équations (8) et (3), être mis sous la forme

$$Q = q\,l \times F\,C'$$
$$R = q\,l \times C'\,D$$

Ils représentent conséquemment le frottement longitudinal de l'eau, Q sur le câble s'il était immergé sans aucun mou, R sur le mou seul du câble.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si le câble était immergé sans mou, f prendrait la valeur

$$P = p\,h - \frac{v}{t}\,p\,h\,\text{tang}\,\frac{\alpha}{2} = p\,h - Q \qquad (11)$$

Pour nous rendre compte plus aisément de l'influence exercée par la vitesse v du navire sur ces deux facteurs, nous examinerons le cas particulier d'un câble atlantique, dont les constantes, d'après Longrigde et Brooks étaient

$p = 0{,}5$ kilogramme par mètre (dans l'eau).

$t = 7$ mètres par seconde.

$u = 1$ mètre par seconde.

Si nous supposons l'immersion faite sur des fonds de 1500 brasses, avec un mou de 10 0/0 ($m = 0{,}1$), pour des vitesses du navire croissant de 1 à 5 mètres par seconde, P, Q, R, f et α auront les valeurs indiquées au tableau ci-dessous.

TABLE I

v	1m	2m	3m	4m	5m
	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
P	1302,81	1300,02	1299,95	1299,88	1300,19
Q	97,19	99,98	100,05	100,12	99,81
R	25,44	84,97	185,08	325,01	503,33
f	1277,37	1215,05	1114,87	974,87	794,86
α	51°50′	28°5′	18°55	14°15′	11°25′
$ph = 1400$ kilogrammes.					

La retenue du frein et le frottement longitudinal de l'eau, lorsque le câble est posé sans mou, sont donc en fait, à peu près indépendants de la vitesse du navire, mais restent proportionnels à la profondeur h de la mer. Le frottement de l'eau, sur le câble posé en excédent du chemin parcouru, est, au contraire, presque proportionnel au carré de la vitesse du navire : la retenue effective à exercer au frein diminue en même temps que ce frottement augmente, de telle sorte que la somme de ces deux quantités reste à peu près constante pour des valeurs variables de v. L'angle d'immersion du câble, enfin, diminue rapidement à mesure que la vitesse du navire augmente.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La table suivante donne la valeur de la retenue à exercer au frein pour des profondeurs de la mer croissant de 500 en 500 brasses et des vitesses du navire variables de 1 à 10 nœuds à l'heure environ, les constantes du câble étant les mêmes que ci-dessus.

TABLE II

Profondeur h en brasses	Retenue f pour des vitesses du navire par seconde de					$p\,h$
	1^m	2^m	3^m	4^m	5^m	
	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
500	417,13	396,79	364,10	318,39	259,63	457,19
1000	834,26	793,59	728,21	636,79	519,26	914,38
1500	1251,4	1190,4	1092,3	955,19	778,88	1371,6
2000	1668,5	1587,1	1456,4	1273,6	1038,51	1828,7
2500	2085,6	1984,	1820,5	1592,	1298,1	2286,
3000	2502,8	2380,7	2184,6	1910,4	1557,8	2743,1

L'angle β qui détermine la direction du mouvement effectif de chaque élément du câble, se calcule facilement par la relation

$$\operatorname{tang}\beta = \frac{E\,D}{E\,C} = \frac{v\sin\alpha}{v\sin\alpha\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} + m\,v} = \frac{1}{\operatorname{tang}\frac{\alpha}{2} + \frac{m}{\sin\alpha}}$$

ou, en remplaçant le dénominateur par sa valeur tirée de l'équation (8)

$$\operatorname{tang}\beta = \frac{v}{t}\,\frac{p\,h}{p\,h - f} \tag{12}$$

Si l'on résout l'équation (8) par rapport à m, on a

$$m = \frac{p\,h - f}{\frac{v}{t}\,p\,h}\sin\alpha - \operatorname{tang}\frac{\alpha}{2}\sin\alpha = \frac{t}{v}\,\frac{p\,h - f}{p\,h}\sin\alpha - 2\sin^2\frac{\alpha}{2} \tag{13}$$

ou

$$m = \cot\beta\sin\alpha - 2\sin^2\frac{\alpha}{2}$$

L'angle d'immersion α étant généralement très petit, dès que la vitesse du navire acquiert une valeur un peu considérable, $\sqrt{\cos\alpha}$ devient négligeable et on peut à l'équation (7) substituer la relation suffisamment approchée

$$\operatorname{tang}\alpha = \frac{u}{v} \tag{14}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour montrer que l'erreur ainsi commise est négligeable, nous calculerons les valeurs de l'angle α, d'après les deux formules (7) et (14), pour le modèle de câble que nous avons déjà considéré ($u = 1$ mètre) et des vitesses du navire variables de 1 à 5 mètres par seconde.

TABLE III

	VITESSE DU NAVIRE				
	1m	2m	3m	4m	5m
Angle α calculé d'après l'équation (7)	31°50′	28°3′	18°33′	14°13	11°23′
Angle α calculé d'après l'équation (14)	43°0′	26°34′	18°26′	14°2′	11°19′

On voit donc que dès que le navire acquiert une vitesse d'à peu près 3 mètres par seconde, soit de six nœuds environ à l'heure, qui est sensiblement celle de la marche moyenne des navires pendant la pose des câbles, les valeurs de l'angle α calculées d'après l'une ou l'autre formule, sont suffisamment voisines pour que l'on puisse, dans la pratique, substituer la formule (14) à la formule (7).

Si l'on calcule maintenant les fonctions trigonométriques de l'angle α d'après sa valeur approchée tirée de l'équation (14), on aura, en négligeant les termes contenant le facteur $\frac{u}{v}$ à des puissances égales ou supérieures à la troisième

$$\sin \alpha = \frac{u}{v}, \quad \operatorname{tang} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2}\frac{u}{v}, \quad \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2}\frac{u}{v}$$

Substituant ces valeurs dans les équations (8), (11) et (13), il vient

$$f = p\,h\left(1 - \frac{1}{2}\frac{u}{t} - m\frac{v^2}{u\,t}\right) \tag{15}$$

$$\mathrm{P} = p\,h\left(1 - \frac{1}{2}\frac{u}{t}\right) \tag{16}$$

$$m = \frac{p\,h - f}{p\,h}\frac{u\,t}{v^2} - \frac{1}{2}\frac{u^2}{v^2} \tag{17}$$

On voit par la dernière de ces relations que le mou du câble est inversement proportionnel au carré de la vitesse du navire; le premier des deux termes qui composent le second membre de cette équation étant de beaucoup supérieur à l'autre, on voit encore que le mou dépend surtout de $ph - f$, c'est-à-dire de la différence entre le poids de la longueur du câble qui serait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

suspendue verticalement dans l'eau, du navire jusqu'au fond de la mer, et la force de retenue du frein. On peut donc faire varier le mou, soit en agissant sur le frein, soit en modifiant l'allure du bâtiment.

Pour étudier l'influence d'une variation de ces deux quantités et de la profondeur de la mer sur le mou, différentions m successivement par rapport aux trois variables f, v et h. Il viendra

$$\frac{d\,m}{d\,f} = -\frac{u\,t}{p\,h\,v^2}$$
$$\frac{d\,m}{d\,v} = -\frac{2\,m}{v}$$
$$\frac{d\,m}{d\,h} = \frac{u\,t\,f}{p\,v^2}\,\frac{1}{h^2}$$

par suite

$$(d\,m)_t = -\frac{d\,f}{f}\,\frac{u\,t\,f}{p\,h\,v^2} \tag{18}$$

$$(d\,m)_v = -\frac{d\,v}{v}\,2\,m \tag{19}$$

$$(d\,m)_h = \frac{d\,h}{h}\,\frac{u\,t\,f}{p\,h\,v^2} \tag{20}$$

On remarquera que le second membre de l'équation (19) étant indépendant des constantes du câble et de la profondeur de la mer, le premier ne dépend que de la variation relative de la vitesse du navire. Si celle-ci augmente de 5 p. 100, par exemple, le mou diminuera de 0,1 de sa valeur et tombera par suite, à 9 p. 100, s'il était de 10 p. 100 précédemment. D'un autre côté, la même expression $\frac{u\,t\,f}{p\,h\,v^2}$ se trouvant en facteur dans les seconds membres des équations (18) et (20), le mou variera de quantités égales, mais en sens inverse, pour les mêmes variations proportionnelles de la retenue du frein et de la profondeur de la mer. Si nous reprenons le câble dont nous avons déjà donné les constantes, $p = 0{,}5$ kilogramme, $t = 7$ mètres par seconde, $u = 1$ mètre par seconde, et que nous le supposions immergé par 2000 brasses de profondeur, avec 10 p. 100 de mou, la vitesse du navire étant de 3 mètres par seconde, on trouve par la relation (15), que la retenue du frein doit être de 1483 kilogrammes. Les équations (18) et (20) donnent alors

$$d\,m = -0{,}62\,\frac{d\,f}{f}$$
$$d\,m = 0{,}62\,\frac{d\,h}{h}$$

Si la profondeur de la mer augmente de 5 p. 100, soit de 100 brasses, le mou augmentera de 0,031 de sa valeur et passera de 10 p. 100 à 13,1 p. 100; pour le maintenir à 10 p. 100, il suffira d'augmenter la retenue du frein dans le même rapport que h, c'est-à-dire de 5 p. 100, soit de 74 kilogrammes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'après ce qui précède, la profondeur de la mer et la retenue du frein font varier le mou dans une proportion plus rapide que la vitesse du navire : aussi agit-on de préférence sur le frein pour augmenter ou diminuer la quantité de câble dépensée en plus du chemin parcouru.

Si l'on voulait poser un câble sans frein, on aurait pour le mou, en faisant $f = 0$ dans l'équation (15)

$$m = \frac{1}{2}\,\frac{u\,(2\,t - u)}{v^2}$$

Les constantes du câble étant données, le mou ne dépendrait donc plus que de la vitesse du navire. Avec $u = 1$ mètre, $t = 7$ mètres, $v = 3$ mètres par seconde, m deviendrait égal à 72 p. 100. Pour le maintenir à 10 p. 100, il faudrait augmenter la vitesse du navire, de telle sorte que

$$v = \sqrt{\frac{u\,(2\,t - u)}{2 \times 0{,}1}}$$

ce qui conduirait, dans le cas particulier, à $v = 8$ mètres par seconde ou environ 16 nœuds à l'heure. La pose d'un câble pareil, sans frein, et avec 0,1 de mou seulement, serait donc pratiquement presque impossible : mais en altérant les constantes du câble, et faisant, par exemple, $u = 0{,}5$ mètre, $t = 4$ mètres par seconde, $m = 0{,}1$, la vitesse du navire serait de $v = 4{,}3$ mètres ou d'environ 8 nœuds 1/2 que les navires conservent facilement.

Si en outre ce câble devait être posé sans mou, il faudrait que

$$2\,t - u = 0$$
$$2\,t = u$$

ce qui suppose un frottement longitudinal considérable ou l'emploi de parachutes destinés à retarder le glissement du câble le long de son axe.

§ 4. — IMMERSION DES CABLES DE GRANDS FONDS

Ordinairement, on fixe à l'avance le mou avec lequel le câble doit être immergé en moyenne : il est prudent de ne pas le faire descendre au-dessous de 6 p. 100 et de le porter au moins à 10 ou 12 p. 100 lorsque l'on passe sur des fonds en pente. La vitesse du navire pendant les poses de câbles, étant généralement de 6 à 8 nœuds à l'heure, on dresse à l'avance plusieurs tables correspondant à des vitesses du navire, comprises entre ces limites et donnant, pour des profondeurs variant de 50 en 50 brasses, par exemple,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la charge à appliquer au frein pour obtenir un mou compris entre 6 et 15 p. 100.

Câble de . . . . . à . . . . . Constantes $\begin{cases} p = \\ t = \\ u = \end{cases}$

Table indiquant les charges à appliquer au frein pour une vitesse du navire de nœuds à l'heure

MODÈLE N° 5.

Profondeur de la mer en brasses	MOU DU CABLE									
	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1 0	0,11	0,12	0,13	0.14	0.15
. . . . .										
. . . . .										
1050										
1100										
1150										
1200										
. . . . .										
. . . . .										

Signature :

Il est donc aisé de régler le mou, si l'on connaît la profondeur de la mer aux différents points de la route. Les sondages que l'on a faits avant l'immersion ont dû être assez nombreux pour que l'on puisse tracer un profil exact de la mer, entre les deux points d'atterrissement : la question revient donc à connaître exactement la position du navire à chaque instant. On sait que ces positions se déterminent par des observations astronomiques : malheureusement, elles exigent un temps clair et ne peuvent se faire qu'à certaines heures de la journée ; en général, on ne peut même compter d'une manière certaine que sur celles de midi. Dans l'intervalle, on en est réduit à estimer au loch le chemin parcouru : pour obtenir de cet instrument les indications les plus exactes possibles, il convient de le laisser en permanence à la mer et d'enregistrer électriquement, à bord, les indications qu'il donne.

Le loch enregistreur automatique de Walkers convient également à cet effet. Cet appareil se compose d'une tige de cuivre, munie d'ailettes horizontales et plongée dans l'eau ; la tige est entraînée à la suite du navire par une corde en chanvre qui la relie à un compteur placé à bord. Sous l'influence du mouvement de rotation de la tige, la corde se tord : cette torsion régularisée par un volant formé de quatre boules métalliques, est transmise au compteur qui l'enregistre d'une manière continue. On en déduit le chemin parcouru à l'aide d'expériences faites préalablement.

La principale cause d'erreur dans les estimations de routes, faites au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

loch, est due aux courants qui sillonnent la surface de la mer, le loch donnant la vitesse du navire relativement à celle de la masse d'eau au milieu de laquelle il se meut, et non sa valeur mesurée sur le fond.

M. Werner Siemens a proposé d'immerger, en même temps que le câble, un cordage ayant les mêmes constantes t et u. Ce cordage retenu par un frein avec une force suffisante serait posé sans aucun mou et par conséquent se trouverait tendu sur le fond : la longueur qui en serait dépensée représenterait donc exactement le chemin parcouru par le navire. Des essais de ce système ont été faits à bord du *Faraday*, pendant l'immersion du câble atlantique de 1879, avec des fils de piano semblables à ceux servant aux sondages. Mais le raccordement, en pleine marche, du fil d'une bobine dont le déroulement était terminé avec celui de la bobine suivante, présenta des difficultés telles, qu'on fut conduit à enrouler 50 et même 70 milles de fil de piano sur une même bobine : l'inertie de celle-ci amenait alors des ruptures du fil, de telle sorte que les essais durent être abandonnés.

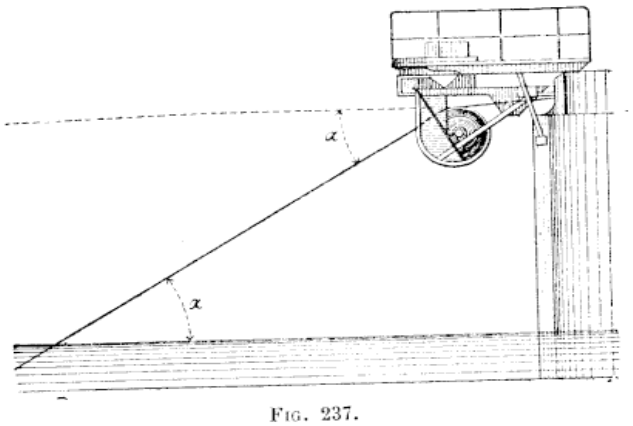


FIG. 237.

Sir William Siemens a indiqué un moyen très commode de s'assurer si la charge du frein est suffisante pour donner la proportion de mou que l'on désire, sans que l'on ait besoin de connaître la profondeur de la mer. La vitesse du navire étant bien uniforme, on augmente progressivement la charge du frein jusqu'à ce que de nouveaux poids ne fassent plus diminuer la vitesse de déroulement du câble. A ce moment, le câble se déroule sans aucun mou ; il suffit donc, en conservant la même vitesse au navire, de soulager le frein jusqu'à ce que l'on obtienne la proportion de mou demandée. L'équation (16) permettrait même de calculer alors la profondeur h de la mer en ce point.

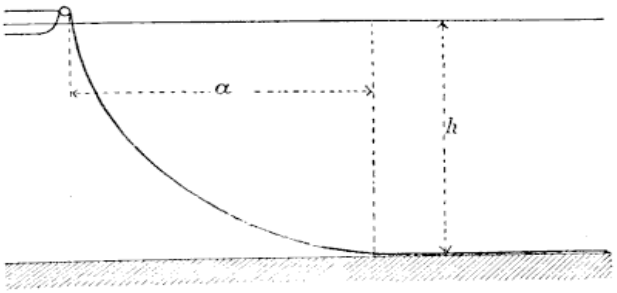


FIG. 238.

L'angle d'immersion α peut être déterminé ap roximativement en mesurant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 237), à l'aide d'un sextant, l'intervalle angulaire compris entre le point où le câble pénètre dans l'eau et la ligne d'horizon. L'observation doit être corrigée de la dépression de l'horizon, laquelle atteint environ 6′ d'arc, si l'observateur est placé à 10 mètres au-dessus du niveau de la mer, et de la réfraction à l'horizon, laquelle peut s'élever jusqu'à 10′ d'arc.

Lorsque le déroulement du câble et la marche du navire sont arrêtés, le câble prend immédiatement, dans l'eau, la forme d'une chaînette (fig. 238). On sait, d'après les propriétés bien connues de cette courbe, que la tension, en un quelconque de ses points, est égale à la tension au point le plus bas, augmentée du poids d'une longueur de câble égale à la distance verticale de ces deux points. La valeur minima de la tension du câble sur le navire, pendant l'arrêt, sera donc ph.

D'un autre côté, comme cette tension est

$$f = \frac{a^2\, p}{8\, h}$$

a représentant la distance horizontale du navire au point où le câble touche le fond, pour réduire f le plus possible, il faut diminuer a, seul facteur variable à ce moment, et, par conséquent, ne stopper que lorsque l'angle formé par la ligne du câble avec l'horizon se rapproche de 90°.

Lorsque l'on arrive en vue de la bouée à laquelle est relié le câble du second atterrissement, on ralentit successivement la marche du bâtiment de façon à stopper aussi près que possible de la bouée, et on laisse filer le câble à la demande jusqu'à ce qu'il tombe à peu près verticalement dans l'eau. On le bosse ensuite à l'arrière, si la machine de pose comprend une machine à vapeur ; dans le cas contraire, on passe à l'avant le bout du câble, coupé en arrière du tambour. On relève d'autre part, comme nous l'avons indiqué précédemment, l'extrémité du câble d'atterrissement ; on en embarque 20 à 25 brasses et on le bosse sur le gaillard d'avant. Si l'état électrique des deux sections est reconnu bon, on les épisse sans tarder l'une sur l'autre. On frappe sur le câble d'atterrissement, près de l'épissure, et sur le câble de mer profonde, à une dizaine de brasses au delà de cette même épissure, deux filins de chanvre neufs que l'on enroule sur les deux tambours de la machine de relèvement : les amarrages doivent être faits sur une longueur de deux brasses au moins et les câbles recouverts en ces points d'un bon matelas en toiles d'emballage. On choque doucement les deux câbles à travers leurs bosses jusqu'à ce que les amarrages viennent s'y présenter. On attache alors sur les deux câbles, près des roues de relèvement, deux œillets (fig. 239) dans lesquels on passe deux autres cordages que l'on porte en double en dehors du navire, l'un à tribord, l'autre à bâbord. L'une des deux extrémités est fixée au platbord du navire, l'autre rentre à l'intérieur en passant à travers un trou d'écubier et est tenue à la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

main par deux ou trois hommes. On choque, à travers les bosses du câble d'atterrissement, l'épissure avec le filin qui l'accompagne et on l'y attache de distance en distance par quelques tours de bitord : on file en même temps une quantité correspondante du cordage qui passe dans l'écubier voisin. Lorsque toute l'épissure a dépassé la dernière poulie du navire, on commence seulement à choquer à travers les bosses, l'arrimage du filin

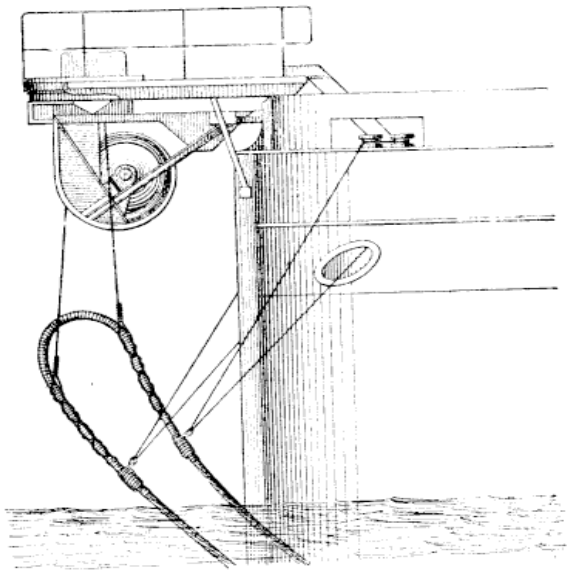


Fig. 239.

frappé sur le câble de mer profonde, et on continue jusqu'à ce qu'il ne reste à bord que quelques brasses de ce câble en double ; on file en même temps, dans la proportion convenable, le cordage qui passe dans le second écubier. On largue entièrement les bosses qui ne contiennent plus que les deux filins ; quelques hommes prennent à la main le double du câble et l'accompagnent jusqu'au dehors du navire, pendant que l'on choque alternativement les filins de tribord et de bâbord. Dès que le câble a dépassé les dernières poulies, on dévire simultanément les deux filins du milieu, en choquant plus doucement les deux extrêmes ; le navire fait machine en arrière pendant un moment, dans une direction perpendiculaire au tracé du câble, pour bien étaler l'épissure ; on coupe à la hache les deux filins frappés sur le câble, puis on lâche les cordages passant à travers les écubiers. Ces cordages filent à travers les œillets et sont halés ensuite à bord par leur extrémité fixe.

Durant la pose, un homme spécialement préposé à ce service, suit dans la cuve les marques en cuir attachées au câble de mille en mille et celles indiquant une soudure de l'âme. Il en observe le passage au compteur du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tambour de pose et note tous ces renseignements sur un carnet du modèle ci-dessous :

Câble de..... à.....

MODÈLE N° 6

Dates et heures	NUMÉROS du compteur	MILLES de câble déroulé	PASSAGE des soudures intérieures	Numéros des bobines d'âmes correspondant à ces soudures	PASSAGE des épissures	Observations
1	2	3	4	5	6	7

Signature :

La cinquième colonne est complétée, après l'opération, à l'aide des carnets qui ont été tenus durant la fabrication et le lovage à bord. Ce carnet joint à celui dont le modèle est donné ci-après permet de fixer ultérieurement la position exacte, au fond de la mer, de toutes les soudures et de toutes les bobines d'âmes employées à la fabrication du câble. En cas de recherche d'une faute, on peut obtenir ainsi des données précieuses pour la localiser exactement.

Le second carnet dont nous venons de parler est une sorte de journal de l'opération dont il doit relater toutes les circonstances. Dans la colonne d'observations, on inscrit une ou deux fois par jour, la température de l'air et celle de l'eau des cuves, la direction du vent et celle des courants, si on peut la connaître, et en général tous les renseignements qui se présentent, lors même qu'ils ne paraîtraient avoir aucune relation immédiate avec le câble.

Immersion du câble de..... à.....

Navire le.....

MODÈLE N° 7

Dates et heures	Vitesse du navire d'après le loch Walkers	Vitesse du navire d'après le loch ordinaire	Chemin parcouru d'après les lochs	Longitudes observées	Latitudes observées	Chemin parcouru d'après les observations	Nombre de tours du tambour depuis la dernière heure	Nombre de tours du tambour depuis la dernière observation	Nombre de tours du tambour depuis l'origine	Longueur de câble déroulé en milles marins depuis la dernière heure	Longueur de câble déroulé en milles marins depuis la dernière observation	Longueur de câble déroulé en milles marins depuis l'origine	Mou du câble d'après les lochs depuis la dernière heure	Mou du câble d'après les lochs depuis la dernière observation	Mou du câble d'après les lochs depuis l'origine	Profondeur de la mer en brasses	Nature du fond	Tension du câble en kilogrammes d'après le dynamomètre	Observations
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Signature :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La position du câble est rapportée ensuite sur une carte marine, ainsi que celle des sondages faits au cours des opérations, avec l'indication de la nature des fonds.

Le câble est soumis en permanence durant son immersion à des essais électriques que nous exposerons en détail dans la quatrième partie de cet ouvrage : les résultats en sont également inscrits sur un carnet.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE X

RÉPARATION DES CABLES SOUS-MARINS

§ 1er. Causes des avaries : causes naturelles ; — ancres des navires ; — animaux sous-marins ; — fautes latentes ; — décharges d'électricité atmosphérique.
§ 2. Opérations a la mer.

§ 1er. — CAUSES DES AVARIES

Les causes des avaries qui atteignent le plus fréquemment les câbles sous-marins, peuvent être rangées en cinq catégories :

1° Frottement du câble sur un fond rocailleux, suspension au-dessus d'une vallée sous-marine, insuffisance du mou dépensé durant l'immersion, choc des bancs de glace qui descendent des pôles, éruptions volcaniques et éboulements sous-marins ;

2° Ancres des navires qui mouillent accidentellement sur le tracé d'un câble, engins des pêcheurs et corailleurs ;

3° Animaux sous-marins dont les uns, tels que les *Teredos*, les *Xylophaga* et les *Limnoria*, rongent l'âme ou ses enveloppes protectrices, et dont les autres, tels que les requins, les scies et les baleines atteignent accidentellement les câbles ;

4° Ruptures intérieures du conducteur et fautes existant à l'état latent dans le câble depuis sa fabrication et devenant apparentes au bout d'un temps plus ou moins long après son immersion ;

5° Décharges d'électricité atmosphérique.

Première catégorie. — Les avaries dues à la nature du fond peuvent être évitées, au moins en partie, en choisissant comme points d'atterrissement des baies de sable, bien abritées contre la mer venant du large. Toutefois, il arrive souvent que les fonds deviennent rocailleux un peu plus loin et subissent de brusques ressauts qui empêchent le câble de reposer unifor-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mément sur le sol. Les mouvements continus de va-et-vient provenant de l'agitation de la mer, de la marée ou des courants, déterminent alors l'usure graduelle, quoique lente, des fils extérieurs, surtout si le câble repose sur une roche. La résistance de l'armature s'affaiblit et ne peut bientôt plus équilibrer la traction que la partie suspendue exerce au point de suspension ; les autres fils finissent par céder et se brisent en même temps que l'âme. On peut échapper à cette cause d'avaries en recouvrant près des côtes, les câbles d'armatures assez lourdes pour les obliger à suivre, aussi exactement que possible, toutes les sinuosités du terrain, et à s'enfoncer par leur propre poids dans le sable ou la vase.

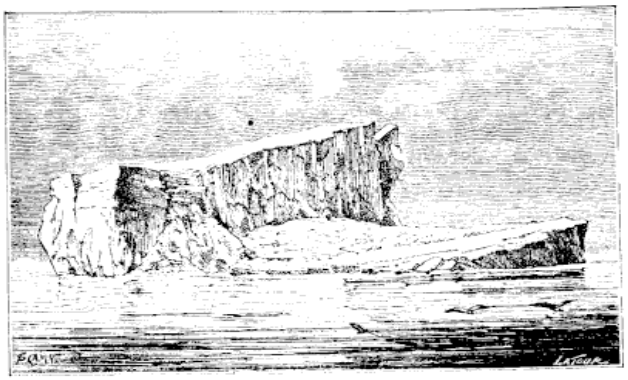


Fig. 240.

Si l'on ne peut éviter les roches à la côte même, on y scelle les câbles à l'aide de crampons en fer.

Les *icebergs* ou *montagnes de glace* (fig. 240) qui descendent du pôle nord, contenant souvent mélangés à la glace, du sable et des débris de roches qui augmentent leur densité, plongent à 5 ou 600 mètres dans l'eau, tandis qu'ils s'élèvent à 100 ou 150 mètres à peine au-dessus de la surface de la mer. Sous l'influence de la marche et du dégel qui s'accentue de plus en plus à mesure qu'ils avancent vers le sud, leurs parties inférieures finissent par ne plus présenter sous l'eau que des arêtes vives. Ces arêtes labourent le fond de la mer, y tracent de profonds sillons, et coupent, comme feraient de fortes cisailles, les câbles qui se trouvent sur leur passage. Ceux de la Compagnie Anglo-Américaine ont été détériorés ainsi à plusieurs reprises : les avaries se sont toujours produites dans les parages de Terre-Neuve, à des distances de la côte inférieures à une centaine de milles marins et par des fonds moyens. Le seul remède à une pareille situation consiste à relever les câbles et à les immerger sur un terrain situé en dehors de la route ordinaire des bancs de glace ; s'il faut absolument les traverser, on s'attache à suivre les plus grands fonds que l'on puisse y rencontrer.

Les éruptions volcaniques et éboulements sous-marins sont des phénomènes heureusement très rares auxquels on a imputé quelquefois et peut-être à tort la destruction de quelques câbles sous-marins. Le câble de Cagliari à Malte ; qui passait entre la Sicile et l'île de Pantellaria, ayant été interrompu deux fois en 1858, près de l'île Maritimo, dans des parages où autrefois avait surgi une île qui avait disparu de nouveau sans laisser de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trace, on avait attribué d'abord ces deux interruptions, sans autre preuve à l'appui, à une éruption volcanique sous-marine. Or, il paraît résulter des témoignages qui ont été produits en 1860, devant le grand Comité d'enquête du *Board of trade* et de l'*Atlantic C°* que ces interruptions n'étaient dues qu'à des bateaux de pêche.

En 1873, le câble de Falmouth à Bilbao appartenant à la *Direct Spanish C°*, fut interrompu et se trouva enterré sous un éboulement qui s'étendait sur plusieurs milles de longueur : il fallut sacrifier cette partie du câble. L'éboulement fut également attribué, à une action volcanique que rien ne démontre et pourrait aussi bien avoir une origine physique purement accidentelle.

Enfin, plus récemment, au mois de février 1887, le câble d'Antibes à Saint-Florent qui relie directement la France continentale à la Corse, a été interrompu au moment même où se produisait le tremblement de terre qui a si fortement éprouvé la ville de Nice et ses environs : l'avarie fut mise sur le compte du tremblement de terre. Mais deux autres interruptions s'étant produites sur le même câble peu de temps auparavant, il est au moins permis de se demander si cette coïncidence ne serait pas purement fortuite et s'il ne conviendrait pas de chercher ailleurs que dans les phénomènes volcaniques qui offrent une explication facile, les causes de cette rupture.

On ne peut protéger les câbles contre ce genre d'accidents qu'en les immergeant en dehors des parages où des éruptions ou des éboulements peuvent être à craindre et en renforçant leur armature à la traversée des parties de terrain qui inspireraient quelques doutes.

Dans les pays tropicaux, surtout aux abords des côtes, la température de la mer dépassant parfois 30°, l'âme des câbles en gutta-percha peut subir des déformations susceptibles d'amener tout au moins un affaiblissement de l'isolement du diélectrique. Les câbles en caoutchouc de M. Hooper résistent parfaitement à ces températures : leur emploi est donc indiqué dans ces conditions.

2° CATÉGORIE. — En général, on évite de faire traverser aux câbles sous-marins les endroits spécialement affectés aux mouillages des navires ; ceux-ci jettent l'ancre cependant parfois en pleine côte, et dans la Manche même, dont la profondeur ne dépasse nulle part 35 à 40 brasses, en tous ses points. Pendant les tempêtes, ces navires chassent sur leurs ancres, accrochent fréquemment les câbles qui sillonnent le canal dans tous les sens, et les ramènent à la surface lorsqu'ils se disposent à repartir. Généralement, ils rejettent à la mer le câble qui a pu ne pas souffrir de la traction à laquelle il s'est trouvé soumis s'il est d'un modèle suffisamment résistant, mais quelquefois le câble est très lourd, et s'il est posé avec peu de mou, arrive tellement tendu au ras de l'eau, que les quelques hommes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui composent l'équipage de ces petits navires se trouvent impuissants à dégager leur ancre : ils n'ont alors que la ressource de la démaillonner et de la laisser retomber au fond de la mer avec le câble, ou de couper ce dernier à coups de hache. Si la première solution prévaut quelquefois, la seconde est malheureusement encore plus fréquente. Cependant une convention internationale signée en 1884 par tous les États civilisés, a interdit aux navires placés dans ces conditions de couper les câbles, à moins de danger imminent, et leur reconnaît le droit a une indemnité représentative de la valeur de leurs engins, lorsqu'ils ont dû les sacrifier pour conserver intact un câble télégraphique. Cette même convention a institué un système de balisage des câbles, aux abords des côtes, et fixé la largeur de la zone de part et d'autre des câbles à l'intérieur de laquelle la pêche est interdite. Il est à craindre, malheureusement, que les pêcheurs étrangers ne fassent peu de cas de ces règlements, lorsqu'ils vont pêcher en fraude dans les eaux des nations voisines, et qu'ils ne soient même tentés de se rendre de préférence dans les parages interdits, ces zones, par l'immunité dont elles jouiront ordinairement, devant constituer de véritables réserves de poissons. Ne pouvant réclamer la valeur de leurs engins de pêche lorsqu'ils se trouveront engagés dans un câble, ils n'hésiteront pas à sacrifier ce dernier pour sauver leur propriété.

La pêche du corail qui s'exerce jusqu'à des profondeurs de 100 brasses, offre encore bien plus de dangers pour les câbles sous-marins. Dans ces fonds, on immerge, en effet, souvent des câbles déjà plus légers ; les bateaux corailleurs, d'autre part, saisissent facilement un câble avec leurs filets ou dragues composées de fauberts fortement enlacés et ils l'amènent non moins facilement à la surface, surtout s'il n'est pas trop tendu sur le fond, avec les cabestans ou treuils puissants dont ils sont toujours munis. Déçus dans leur espoir d'une pêche fructueuse, ils hésitent d'autant moins à trancher d'un coup de hache le cordage qui embarrasse leurs filets, qu'ils vivent la majeure partie du temps loin de leur pays et s'affranchissent en réalité de toute autorité. C'est ainsi que fut interrompu, en 1876, le câble de Bône à Malte appartenant à l'*Eastern telegraph C°*. Une section très nette fut trouvée en face du cap Rose, à 25 mille environ de Bône, en un endroit très fréquenté par les corailleurs napolitains : des lambeaux de filets étaient même restés entortillés autour des bouts [1].

3e CATÉGORIE. — C'est dans les mers du Levant qu'ont été constatés d'abord les ravages faits dans les enveloppes des fils conducteurs des câbles,

[1] Rapport adressé à l'administration des télégraphes français (août 1876) par l'auteur qui avait été chargé de réparer ce câble avec la *Charente*, le *Hawk*, appartenant à l'*Eastern* C° ayant échoué près de Tarifa, en se rendant à Bône.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par des animaux sous-marins. Une première fois, M. Newall avait reconnu, sur un câble simplement recouvert de chanvre et qui était resté immergé pendant quelques mois seulement, que le chanvre avait été rongé par une sorte de *Teredo*.

En 1859, M. Siemens avait trouvé sur un câble semblable, immergé depuis un an à peine, des millions de petits animaux, les uns pourvus de coquilles, les autres analogues à des vers : le chanvre avait disparu et des trous de forme ronde étaient percés çà et là dans la gutta-percha. Des dégâts analogues ont été relevés depuis lors sur de nombreux câbles, dans presque toutes les mers, notamment dans le bassin occidental de la Méditerranée, la Manche, la mer d'Irlande, l'Océan Atlantique et en particulier sur les côtes du Brésil, le golfe Persique, l'Archipel Indien, etc. Ils sont dus à diverses espèces d'animaux dont les principales sont connues des naturalistes sous les noms de *teredo navalis, xylophaga* et *limnoria lignorum*.

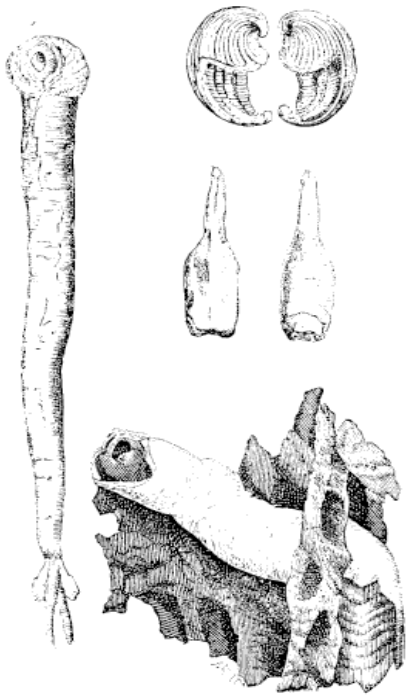


Fig. 241.

Le *teredo navalis* (fig. 241) est une sorte de ver, de couleur grisâtre, appartenant au genre des mollusques acéphales, qui atteint parfois jusqu'à 30 centimètres de longueur. Il porte à l'une de ses extrémités un renflement, en forme de boule, que protègent deux petites coquilles et à son extrémité opposée, deux conduits qu'il peut étendre ou contracter à volonté et qui servent à l'inspiration et à l'expiration de l'eau et des matières organiques nécessaires à sa nutrition. A ces conduits sont attachées deux palettes légèrement bombées qui, en se réunissant, forment un refuge pour eux. Arrivé à l'âge adulte, le teredo se retire dans les galeries qu'il a creusées et s'y enveloppe d'un fourreau de matières calcaires. Il se reproduit à l'aide d'œufs qui, après avoir séjourné pendant quelque temps dans les branchies de la femelle, se répandent dans la mer.

Le teredo attaque les bois les plus durs qu'il rencontre dans l'eau : de gros piliers en chêne plantés dans les bassins du port de Plymouth ont été complétement détruits par ces animaux dans l'espace de quatre ans.

Les ravages qu'il exerçait dans les coques des navires en bois ont été arrêtés par le doublage en cuivre, et il semble que l'on obtienne de meilleurs résultats encore, en recouvrant la surface des pièces de bois que l'on veut

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

protéger, de clous en fer à larges têtes. M. de Quatrefages a conseillé de jeter, de temps à autre, dans les eaux infectées par les teredos, de petites quantités d'un sel quelconque de mercure, de plomb ou de cuivre, de manière à tuer les œufs qui y flottent.

Le *xylophaga* est un coquillage bivalve, d'une espèce très voisine de celle du teredo; il s'en distingue, entre autres particularités, en ce qu'il ne tapisse pas de ses secrétions calcaires les galeries qu'il force. Le xylophaga, comme le teredo, détruit de préférence dans les câbles les revêtements en chanvre, et semble cheminer le long de l'âme en gutta-percha dont il n'entame de temps à autre que la surface, sans pénétrer profondément dans cette substance.

On a même émis l'opinion que les animaux du genre teredo n'étaient attirés vers les câbles que par le chanvre et le goudron, et n'attaquaient la gutta-percha que pour la goûter. Le fait suivant semble donner quelque probabilité à cette opinion : lors d'une réparation du câble de Douvres à Calais de 1851, on constata la disparition complète du chanvre sur tous les points où la corrosion du fer l'avait mis à découvert; mais l'âme n'était perforée que de deux trous pénétrant jusqu'au fil de cuivre. D'un autre côté, tous les bouts du câble d'expérience Douvres-Calais, de 1850, qui ont été retirés de la mer jusqu'à présent, ont toujours été trouvés sans la moindre trace d'attaque d'un animal quelconque. Or, on se rappelle que ce câble ne comprenait qu'un fil de cuivre recouvert de gutta, sans aucune protection extérieure.

La *limnoria lignorum* ou *limnoria tenebrans* (fig. 242), le plus redoutable ennemi de la gutta-percha, est un petit crustacé, de la grosseur d'une fourmi,

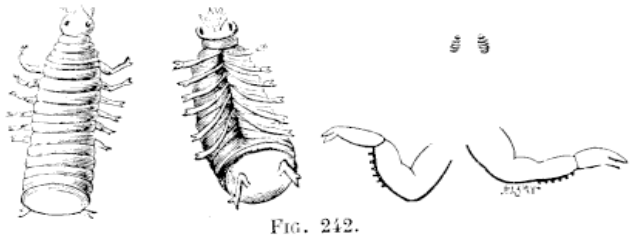


FIG. 242.

qui se glisse facilement à travers les interstices les plus étroits que laissent entre eux les fils de fer de l'armature d'un câble, pour arriver à l'âme qu'il perfore de part en part jusqu'au conducteur en cuivre. Sa tête est armée de cinq ou six paires de crocs; des pattes semblables à celles des homards sont attachées aux six premiers anneaux de son corps; le dernier en porte également une paire.

Les animaux qui percent les câbles n'habitent pas en général les grandes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

profondeurs. Nous avons cependant trouvé, en 1880, sur le plus ancien câble de Marseille à Alger, un défaut grave qui leur est imputable [1], par plus de 900 brasses de profondeur. La gutta-percha portait des morsures vermiculaires sur une longueur de plus de 150 mètres, mais n'était percée que d'un seul petit trou pénétrant jusqu'au conducteur en cuivre même. Le chanvre en tous ces points était intact ; l'armature en fer n'était nullement détériorée ; l'enveloppe bitumineuse extérieure était même encore adhérente à l'armature, mais s'en détachait facilement.

On a également constaté sur des fragments du câble Atlantique de 1865 relevés il y a quelques années, les traces non douteuses des animaux qui avaient rongé le chanvre.

A terre, la gutta-percha est exposée aux attaques d'autres animaux encore, parmi lesquels nous citerons les rats dont les ravages dans les égouts de Paris sont bien connus et le *templetonia cristallina,* insecte microscopique de la famille des *Podura,* qui a été trouvé en Angleterre sur des lignes télégraphiques souterraines. On peut les en préserver en noyant les fils recouverts de gutta dans du ciment.

En 1852 déjà, MM. E. et Ch. Bright proposaient de recouvrir les câbles de fils de chanvre et d'un ruban métallique très mince, pour protéger la gutta-percha contre les teredos La composition bitumineuse que Sir Ch. Bright fit appliquer, en 1862, sur l'armature extérieure des câbles, devait, au moins en partie, concourir au même but. Il pensait qu'en mélangeant de la silice en poudre au goudron et à la poix qui entrent dans cette composition, les dents des teredos se briseraient immanquablement.

Les deux systèmes sont employés concurremment depuis quelques années sur tous les câbles qui doivent être immergés dans des eaux dont la profondeur est inférieure à cent brasses et dans des parages où les câbles sont particulièrement exposés aux ravages des animaux. L'âme est enveloppée alors

1° D'une forte bande de toile blanche ;

2° D'un ruban de métal de Müntz ou de cuivre phosphoreux :

3° Enfin, d'une seconde bande de toile imprégnée de stéarine et destinée à empêcher toute action galvanique entre le ruban de cuivre et l'armature extérieure en fer. Les lignes des deux compagnies *Eastern Extension C°* et *Eastern and South African C°*, immergées dans des mers infestées de teredos, ont été protégées de cette manière et ont parfaitement résisté.

[1] Relation des opérations entreprises en 1880-1881, pour la réparation du câble Marseille-Alger de 1871, par l'auteur. *Annales télégraphiques*, année 1887, p. 110.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les câbles sous-marins sont aussi détruits quelquefois par les animaux de grande taille qui peuplent la mer, tels que les requins, les espadons, les baleines.

On a reconnu sur différents câbles, notamment sur ceux de la Floride et des mers de Chine, des traces de morsures dues aux requins : des dents appartenant à la variété des requins dite *requin-marteau* qui fréquente les parages méridionaux de la Méditerranée ont été trouvées sur une partie dénudée de l'ancien câble de Malte à Alexandrie et entre les fils de fer de l'armature du câble appartenant à la France, qui mettait en communication, il y a une vingtaine d'années, la Sicile avec Bizerte (Tunisie).

Le câble de Para à Demerara a été, à plusieurs reprises et en différents endroits, attaqué par les espadons qui abondent sur la côte brésilienne, attirés par les baleines qu'ils poursuivent et attaquent avec vigueur. Ces squales ont l'habitude de fouiller les fonds de la mer avec leur appendice buccal pour y chercher de la nourriture : il est probable que leur scie s'engage parfois dans les interstices de l'armature des câbles et au milieu des efforts qu'ils font pour s'en dégager, l'âme peut être atteinte et meurtrie.

En 1881, Sir Henry C. Mance a relevé dans le golfe Persique un morceau de câble dans lequel était restée implantée une dent d'espadon : cette dent fortement serrée entre les fils de fer de l'armature, traversait la gutta-percha et pénétrait jusqu'au conducteur en cuivre [1].

Le navire *Amberwitch* ayant eu à réparer, en 1876, la section de Kurrachee à Gwadur, de ce même câble, éprouva en le relevant, dans le voisinage de la rupture, une résistance tout à fait insolite comme si le câble était accroché à une roche; en persévérant pendant quelque temps, on finit par remonter une énorme baleine entortillée dans le câble. Le corps du cétacé était pris immédiatement au-dessus de la queue et lié par deux tours et demi de câble. La queue qui avait 12 pieds de large était parfaitement conservée et recouverte de nombreux coquillages à ses extrémités : des requins et d'autres poissons avaient en partie dévoré la carcasse qui était déjà presque décomposée, au point que la mâchoire se détacha en arrivant à fleur d'eau. Probablement la baleine avait dû se servir du câble pendu au-dessus d'un précipice sous-marin comme d'un grattoir pour se débarrasser des parasites qui tracassent toujours les cétacés, et l'animal avait pu, d'un seul coup de sa queue, briser le câble et l'enrouler plusieurs fois autour de son corps de façon à en être étouffé [2]. Les sondages exé-

[1] *Journal of the Society of telegraph Engineers and Electricians*, année 1882.

[2] Rapport de M. Isaac Walton, surintendant des télégraphes du Mekran et du golfe Persique, au gouvernement de Bombay.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cutés en ce point même étaient très irréguliers et indiquaient un ressaut de 70 à 30 brasses.

Bien qu'il soit difficile de mettre les câbles absolument à l'abri de ces causes d'avaries, heureusement très rares, on en diminue certainement les chances dans une forte proportion en laissant reposer les câbles sur le fond de la mer dans toute leur étendue, ce qui suppose une étude préalable très complète du profil du sol, le long de la route à suivre.

4e CATÉGORIE. La rupture du conducteur, à l'intérieur de son enveloppe isolante, se produit assez fréquemment, quelquefois aux soudures, le plus ordinairement en pleine ligne, à la suite d'une traction exercée sur le câble, soit durant sa fabrication, soit durant son immersion. On l'évite en n'employant que du cuivre parfaitement recuit, en s'assurant par des épreuves répétées qu'il est capable de résister par l'allongement à un effort déterminé, en prenant soin de ne pas tirer les fils de cuivre plus qu'il n'est absolument nécessaire durant la fabrication de l'âme et enfin en faisant supporter, autant que possible, aux enveloppes extérieures seules toute la traction exercée sur le câble.

Le conducteur en cuivre peut être rongé aussi par le courant même de la pile de transmission si, en un point du diélectrique, existe une faute suffisante seulement pour livrer passage à une quantité d'eau tout à fait imperceptible. Au contact de cette eau et du cuivre, le courant positif donne naissance à des oxychlorures de cuivre qui, au bout de quelque temps, se développent avec d'autant plus de rapidité que la résistance du circuit augmentant, on est obligé d'accroître la force électromotrice de la pile pour obtenir toujours une même intensité de courant. Nous avons trouvé, en 1877, le câble qui relie le sémaphore des îles Sanguinaires à la Corse, complètement interrompu de cette manière : un galvanomètre assez grossier indiquait simplement un isolement des deux côtés de la ligne ; les extrémités du conducteur rompu furent trouvées, dans la gaine en gutta, séparées par un intervalle de 8 à 10 millimètres contenant une poudre bleu verdâtre de sels de cuivre. On peut longtemps retarder au moins l'entière interruption du conducteur, en employant dans les postes extrêmes des appareils récepteurs très sensibles, n'exigeant que de faibles intensités de courant, et évitant avec soin l'emploi de courants alternés, le courant négatif réduisant les sels formés sous l'action du courant positif. Il est même avantageux de maintenir dans ce cas le conducteur à un potentiel négatif permanent : nous indiquerons plus loin les dispositions qui ont été prises à cet effet dans quelques cas particuliers.

Dans les câbles de Hooper, il arrive parfois que le séparateur n'agissant pas avec assez d'efficacité, le soufre pénètre dans la couche intérieure de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

caoutchouc pur, et arrive jusqu'au conducteur en cuivre qu'il rend cassant. Ce défaut peut être évité par un dosage exact de la proportion de soufre que l'on incorpore à la couche extérieure de caoutchouc destinée à être vulcanisée et des matières entrant dans la composition du séparateur.

En ce qui concerne les fautes accidentelles restées latentes jusqu'après l'immersion et qui ne se développent qu'avec le temps, on peut les éviter en grande partie au moins, en soumettant à un système d'essais rationnels et méthodiques le câble durant sa fabrication, son embarquement à bord et son immersion. On doit avoir soin de vérifier à fond chaque bobine d'âme après sa fabrication, de même que les soudures qui la réunissent aux autres bobines. En continuant à essayer, en détail et en bloc, le câble tout entier, la majeure partie des fautes qui ne se seraient déclarées qu'au bout d'un temps plus ou moins long, peuvent être découvertes et éliminées en cours de fabrication même. On fera ainsi l'économie des dépenses toujours considérables qu'entraîne la réparation d'une faute dans un câble immergé.

5e CATÉGORIE. — Les câbles sous-marins d'une certaine longueur n'étant jamais mis en communication immédiate avec une ligne télégraphique aérienne, sont, par leur position même, peu exposés à être foudroyés par des décharges directes d'électricité atmosphérique ; mais il n'en est pas de même du choc en retour qu'ils reçoivent par l'intermédiaire des plaques de terre. Les câbles de moindre importance sont au contraire souvent reliés à des lignes aériennes et soumis par conséquent, non seulement à l'effet indirect, mais à la décharge immédiate des nuées orageuses. Il est donc nécessaire de protéger les câbles, dans tous les cas, par des paratonnerres placés dans les guérites d'atterrissement.

Les paratonnerres les plus spécialement employés à cet effet sont :

1° Le paratonnerre à papier composé de deux plaques de laiton reliées l'une à la ligne, l'autre à la terre et séparées par une feuille de papier paraffiné ; cette feuille de papier s'oppose au passage des courants voltaïques mais est percée par une décharge d'électricité statique intense, laquelle s'écoule ainsi directement à la terre ;

2° Le paratonnerre Bertsch formé de deux plaques de fonte isolées l'une de l'autre par quatre colonnes en ébonite et reliées, l'une à la ligne, l'autre à la terre ; sur chacune de ces plaques sont fixées 300 pointes d'acier argenté, placées exactement en regard les unes des autres, à des distances d'un millimètre environ. Des lames de verre, disposées entre les plaques de fonte, mettent les pointes à l'abri de l'humidité de l'air, tout en permettant de vérifier facilement l'état du paratonnerre. L'électricité statique s'écoule en très grande partie par ces pointes, en vertu de la pro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

priété bien connue sous le nom de *pouvoir des pointes;* les courants des piles traversent intacts, au contraire, l'appareil;

3° Le paratonnerre de M. Siemens composé de deux plaques de fonte striées dans deux directions rectangulaires et isolées l'une de l'autre par une couche d'air d'un millimètre d'épaisseur environ : la plaque supérieure repose sur quatre montants en ébonite fixés à la plaque inférieure et est reliée à la ligne, tandis que cette dernière est en communication avec la terre. L'électricité s'accumule aux points d'intersection des stries que l'on suppose agir comme autant de pointes, bien que cette assimilation n'ait jamais été prouvée;

4° Le paratonnerre à fil préservateur formé d'un fil de fer ou de platine extrêmement tenu, recouvert de soie et enroulé sur un tube de cuivre en communication avec la terre; le tube, terminé par deux plaques d'ébonite, est noyé dans un bloc de paraffine pour éviter les pertes de courants qui se produisent à travers l'enveloppe de soie, par suite de l'humidité qui règne dans les guérites d'atterrissement. Un courant énergique rougit le fil fin, brûle la soie et met la ligne en communication avec la terre.

Quelquefois, on se borne à enfermer le fil fin de platine dans un tube de verre de 25 à 30 centimètres de longueur. Le fil est brûlé par une décharge d'électricité atmosphérique, et laisse la ligne isolée jusqu'à ce que l'on vienne le remplacer;

5° Le paratonnerre de M. A. Jamieson basé à la fois sur le pouvoir des pointes et la propriété dont jouissent les fils métalliques fins de fondre sous l'action d'un courant intense. Il présente l'avantage de maintenir la communication après le passage d'une première décharge, et se compose (fig. 243) d'un cylindre plein en cuivre A strié longitudinalement, enveloppé d'un cylindre annulaire B dont la surface intérieure est filetée : les deux cylindres sont séparés par une mince couche d'air et supportés par des montants en ébonite. L'axe du cylindre A est en communication d'un côté avec la ligne aérienne ou souterraine ; à son extrémité opposée est fixé un ressort en acier très mince C qui porte un bouton D. Un fil de cuivre ou de platine très fin est tendu entre le bouton D et une borne E qui est en communication permanente avec une borne F. A la borne F est attaché un fil d'un diamètre un peu plus gros que celui du fil DE, recouvert de soie et qui, après s'être enroulé plusieurs fois autour du cylindre B aboutit à la borne G à laquelle arrive également le câble sous-marin. Un deuxième fil de cuivre fin est placé entre la borne F et un bouton H ; il est tendu par le ressort I, attaché d'une part au bouton H et encastré d'autre part dans une borne K. En arrière des boutons D et H se trouvent deux vis d'arrêt

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M et N, qui communiquent, la première avec la borne K ; la deuxième avec la terre ; le cylindre annulaire B est également relié avec cette dernière.

Un courant voltaïque ordinaire arrivant par le cylindre plein A, suit le ressort C, le fil DE, arrive à la borne F, et par l'intermédiaire du fil recouvert, à la borne G et au câble. Une décharge atmosphérique s'écoulera partiellement par les stries des cylindres A et B ; si le fil fin DE était brûlé, le

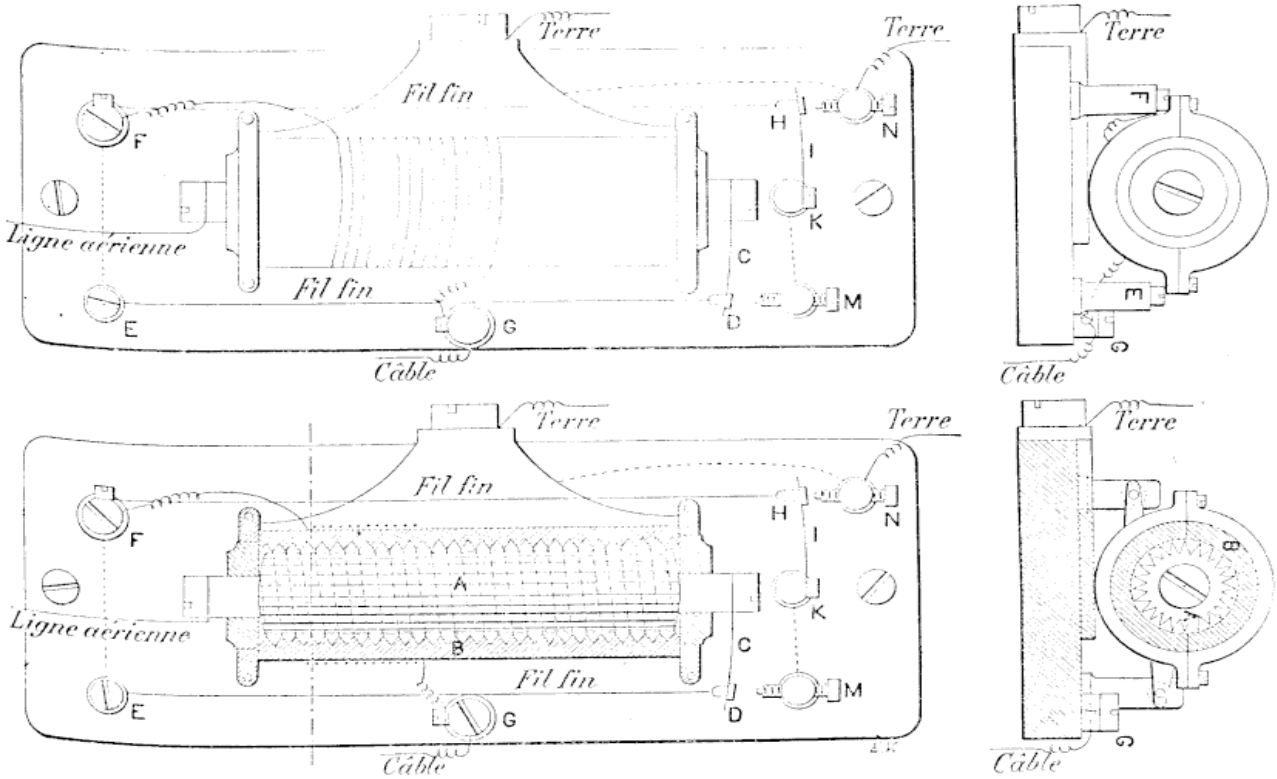


Fig. 243.

bouton D se mettrait en contact avec la borne M, et la communication serait maintenue à travers M K H, et le deuxième fil fin HF. Dans l'un et l'autre cas, la ligne resterait encore protégée par le fil recouvert enroulé sur le cylindre B. Ce fil établirait une communication directe avec la terre si l'électricité atmosphérique avait une intensité suffisante pour le faire rougir et par suite brûler la soie qui le recouvre.

Pour faciliter la décharge entre les cylindres A et B, on peut faire le vide dans l'espace qui les sépare.

Tout l'appareil est enfermé dans une boîte qui met les communications à l'abri de l'humidité ;

6° Le paratonnerre à vide de Varley composé d'un tube de verre entière-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment fermé, et traversé à ses deux extrémités par deux fils de platine effilés, placés en regard l'un de l'autre ; on fait le vide dans le tube avant de le sceller. L'un des fils de platine est mis en communication avec la ligne, l'autre avec la terre : la décharge s'opère plus facilement entre les deux pointes, à travers le vide, qu'à travers l'air.

Ordinairement, on place plusieurs de ces paratonnerres, à la suite les uns

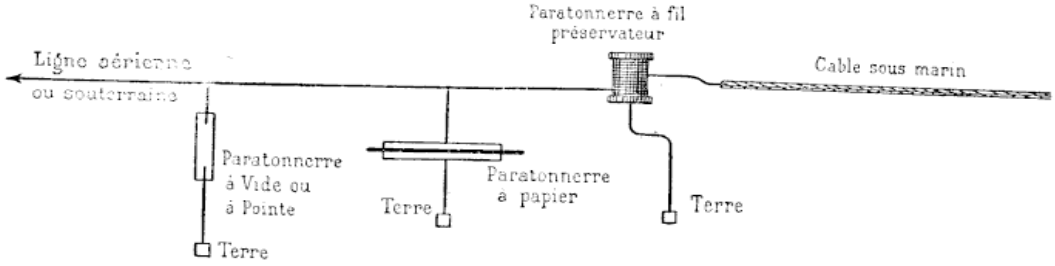


FIG. 244.

des autres, sur le câble ; les paratonnerres à pointes doivent précéder ceux à fils, et sont placés sur une dérivation seulement de la ligne (fig. 244). Durant les orages d'une violence exceptionnelle, il est même prudent de supprimer toute communication entre les câbles sous-marins et les lignes aériennes ou souterraines : on peut indifféremment laisser le conducteur en cuivre du câble isolé à ses deux extrémités ou le mettre à la terre. Cette terre doit être absolument distincte de celle des fils aériens ; ordinairement on la prend sur plusieurs fils de fer de l'armature même du câble sous-marin.

§ 2. — OPÉRATIONS A LA MER

Les opérations à effectuer à la mer sont toujours précédées d'essais électriques destinés, soit à constater simplement la nature du défaut, lorsqu'il s'agit d'une ligne côtière de peu d'étendue immergée dans des eaux peu profondes, soit à déterminer la position du point fautif ou de la rupture du câble, dans tous les autres cas. Ces essais doivent être exécutés dans les guérites d'atterrissement même, de manière à ne comprendre que la partie sous-marine de la ligne, à l'exclusion de toute section aérienne ou souterraine. Les expériences ne donnant que la résistance électrique de la partie du câble comprise entre la guérite et la faute, on en calcule la longueur soit d'après la résistance électrique moyenne du câble par mille, lorsqu'il est suffisamment homogène, soit d'après les résistances des diverses sections de la ligne, telles qu'elles résultent des carnets de fabrication et de pose. On déduit de cette longueur le mou dépensé d'heure en heure, d'après le journal de pose. En portant la différence sur la carte à partir du point d'at-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

terrissement, et en suivant le tracé du câble on peut y marquer la position de la faute.

Lorsque la réparation doit se faire à proximité de la côte, on se rend sur le lieu des opérations dans un grand canot bien armé (fig. 245) muni à l'avant d'une petite poulie en fer mobile autour d'un axe horizontal. A l'arrière de l'embarcation, le plat-bord porte, dans le même plan vertical que la poulie, soit une entaille demi-circulaire de 5 à 6 centimètres de diamètre, garnie d'une feuille de tôle, soit un rouleau horizontal avec guides de chaque côté. Près de la guérite, à quelques brasses sous l'eau, on aperçoit généralement le câble, qu'il est dès lors facile de saisir et de capeler sur la roue et dans l'entaille ; quelquefois cependant, le câble est recouvert de dépôts de sable, de gravier ou de vase, ou enfoui sous les varechs, et il devient nécessaire de le chercher ailleurs. On attache alors un petit grappin à l'extrémité d'une corde en chanvre, d'une longueur supérieure d'un tiers au moins à la profondeur de la mer en ce point, et on le laisse traîner dans le fond, pendant que le bateau court, à l'aviron, de petites bordées en travers de la ligne présumée du câble. Dès qu'il est saisi, les hommes halent le canot sur la corde jusqu'à ce qu'ils soient à l'aplomb du grappin : ils hissent ensuite celui-ci à bord (fig. 246) avec le câble qui est capelé comme précédemment. Un câble lourd ou assez fortement tendu rend cette manœuvre très pénible et quelquefois dangereuse, le canot se trouvant alors dans un état d'équilibre instable, et ayant une tendance à chavirer. Il convient, pour ces motifs, d'employer une embarcation assez large et de placer l'axe de la poulie aussi bas que possible.

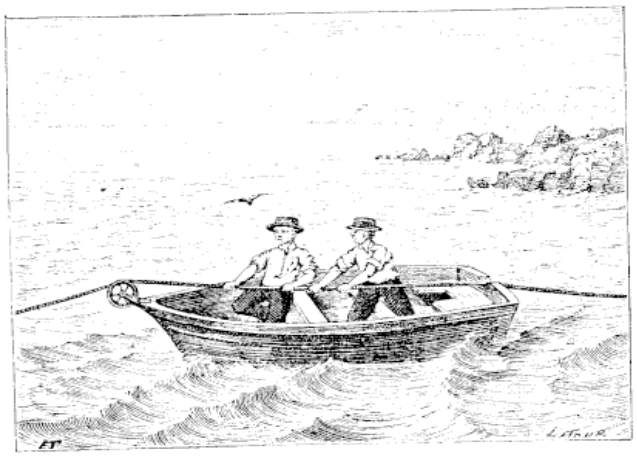


FIG. 245.

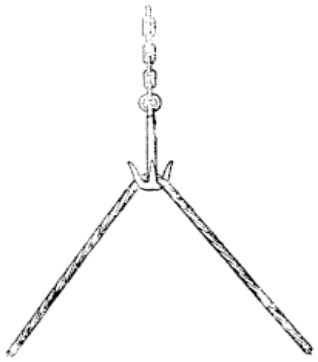


FIG. 246.

Les hommes, en se halant ensuite sur le câble, et cadençant bien leurs mouvements, en tirent à l'avant chaque fois une nouvelle longueur qui sort de l'eau, pendant qu'une longueur correspondante rentre dans la mer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à l'arrière. On arrête le travail lorsque l'armature nécessite quelques réparations ; ces réparations se font ordinairement en recouvrant la partie avariée, si quelques fils de fer seulement sont en mauvais état, de fil à ligature et d'une enveloppe de bitord serré à la mailloche.

On arrive ainsi généralement à une cassure du câble. Le bout en est relié à une petite bouée, par l'intermédiaire d'un cordage léger en chanvre, et on drague immédiatement après le bout correspondant qui doit nécessairement se trouver dans le voisinage du premier. Lorsqu'on l'a trouvé, que l'armature du câble a été reconnue bonne aux environs et que les conditions électriques de cette section sont jugées satisfaisantes, on l'épisse sur un morceau de câble neuf que l'on déroule à la main jusqu'à la bouée, soit en se faisant remorquer par un second canot, soit en se halant sur une corde que l'on attache à celle de la bouée. Le second bout du câble à réparer est épissé sur le câble neuf, coupé à une longueur convenable, et le double rejeté ensuite à la mer par-dessus l'embarcation.

Lorsque l'armature n'est pas cassée en même temps que l'âme, ou si le conducteur en cuivre est rompu à l'intérieur du diélectrique, la faute n'est plus visible extérieurement, et il devient nécessaire de couper le câble de temps à autre. On choisit à cet effet des points faibles de l'armature et l'on s'assure, à l'aide d'un galvanomètre et d'une pile portative que l'on a eu soin d'embarquer dans le canot, si l'on a dépassé ou non la faute ; le travail s'achève comme précédemment.

L'opération qui consiste à faire glisser un canot sous un câble, et à laquelle les marins donnent le nom de *paumoyage*, exige des efforts musculaires assez considérables de la part des hommes, lorsque l'on ne dispose pas d'un canot à vapeur qui prend la première embarcation à sa remorque. En général, on ne peut dépasser ainsi les fonds de 50 à 60 brasses, cette profondeur dépendant néanmoins du poids du câble que l'on a à soulever. Lorsque la faute doit être recherchée en un point plus éloigné, on coupe le câble ; le côté de terre est relié à une bouée, et le navire prend à son bord le côté du large, à l'aide d'un bon cordage qui passe dans la machine de relèvement et sur lequel on frappe l'autre bout du câble. Les parties relevées sont lovées dans une cuve, et l'opération continue jusqu'à ce que l'on arrive à la faute. Si le câble est cassé, ou vient à casser pendant le relèvement, on immerge immédiatement une bouée destinée à servir de repère, et on drague dans le voisinage le bout correspondant. On rétablit ensuite la communication à l'aide d'un morceau de câble neuf.

Lorsque la faute se trouve dans de grandes profondeurs, et à une distance plus ou moins considérable de terre, le navire se rend à l'endroit présumé de l'avarie, marqué préalablement sur la carte, ainsi que nous l'avons expliqué, et y mouille une bouée dite de *marque*. La position exacte de cette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bouée est relevée avec beaucoup de soin, soit à l'aide d'alignements pris sur la côte, si celle-ci est en vue et suffisamment accidentée, ou d'observations astronomiques, dans le cas contraire. Le fond est exploré aux environs à l'aide d'une série de sondages ; on reconnaît en même temps la direction et la vitesse des courants, s'il en existe. Le navire se porte à un ou deux milles de la bouée, à l'extrémité de la ligne suivant laquelle il compte draguer.

On mouille la drague composée, comme nous l'avons vu, d'un grappin, d'une chaîne en fer et de cordages en chanvre et en fil d'acier, suivis ou non de cordages en chanvre seulement. La longueur de cordage que l'on dévire, ne doit être ni trop courte, ni trop longue ; si elle est trop courte, le grappin, tiré dans une direction trop peu inclinée, saute et ne peut draguer convenablement. Si, au contraire, on a une touée trop longue, une partie du cordage traîne sur le fond, l'effort à faire pour le tirer derrière soi devient trop considérable et on ne se rend plus compte du travail dn grappin ; on risque donc de traverser le câble, s'il n'est plus très résistant, sans s'en apercevoir. Dans les fonds de 1000 à 1500 brasses, une touée de 1/10, c'est-à-dire une longueur de cordage supérieure de 1/10 à la plus grande profondeur que le navire doit rencontrer sur sa route, donne en général une bonne ligne de drague. Dès que le grappin touche le fond, ce que l'on reconnaît aisément à la diminution brusque de la tension marquée par le dynamomètre, on a soin de faire marcher le navire doucement en avant, de manière à étaler la drague et à empêcher la chaîne de s'entortiller dans les branches du grappin. Lorsque tout le cordage est déviré, on enveloppe de toiles d'emballages et de paillassons en chanvre, sur une longueur de 2 à 3 mètres, la partie du filin qui porte sur la roue de relèvement pour en éviter la détérioration, surtout lorsque les fonds sont rocailleux et font sauter fréquemment le grappin.

La route qui a été tracée sur la carte et que suit le navire, à une vitesse moyenne de 2 à 3 nœuds à l'heure, a dû être choisie de manière à couper le câble suivant un angle à peu près droit (fig. 247) ; le sens dans lequel elle est parcourue est déterminé d'après les directions du vent, des courants et le profil du fond de la mer. En général, il est préférable, en draguant, de remonter une côte que de la descendre et de marcher, autant que possible, à la fois contre le vent et les courants : le navire gouverne plus facilement et peut être arrêté plus rapidement, en cas de besoin. Lorsqu'on ne peut se placer dans ces conditions, on ne met en mouvement la machine du bateau que par intervalles et on en profite chaque fois pour redresser sa route. Quelquefois cependant, lorsque les vents ou les courants sont favorables, le navire se laisse aller simplement à la dérive, sans faire aucun usage de sa machine ; il se déplace alors transversalement à sa longueur, de telle sorte

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que la drague, au lieu de s'appliquer, comme à l'ordinaire, contre l'une de ses parois, se trouve dans un plan perpendiculaire à son axe. Le cordage se trouvant entraîné avec la masse d'eau au milieu de laquelle il est plongé, la seule résistance opposée au mouvement par la drague provient des sillons

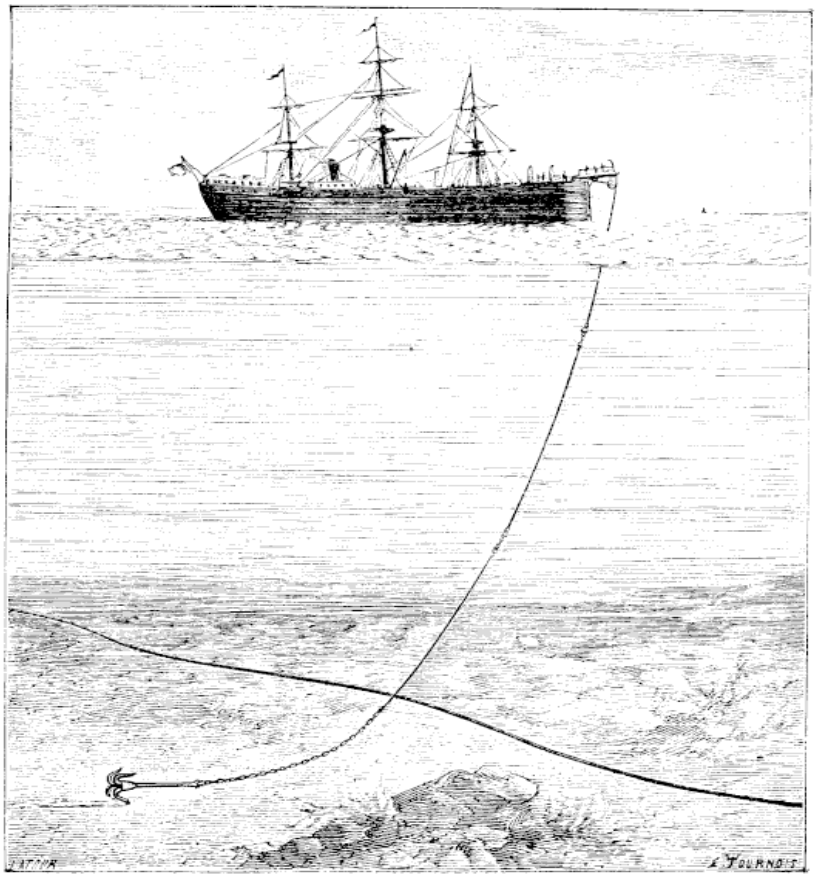


Fig. 247.

que le grappin creuse sur le fond : elle est donc réduite au minimum. Ce procédé, lorsqu'il est applicable, est particulièrement propre au dragage des câbles affaiblis par la rouille ou incapables pour tout autre motif de supporter une grande tension.

Lorsque l'on se trouve dans des eaux d'une profondeur moyenne, si l'on prend dans la main le filin de drague, immédiatement en arrière de la roue de relèvement, on a la sensation très nette de ce qui se passe au fond de la mer. Si le grappin traverse un terrain mou, on perçoit dans le cordage un mouvement vibratoire faible, mais continu ; lorsque le câble est saisi, ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mouvement s'accentue progressivement et a quelque chose de métallique. Si le terrain est rocailleux, la tension du cordage augmente subitement par intervalles et lui donne la rigidité d'une barre de fer, puis retombe brusquement à sa valeur antérieure, lorsque le grappin a échappé à la roche qui le retenait. On évite des pertes de temps et de matériel en employant alors le grappin à branches articulées de M. Jamieson.

Lorsque l'on dragne sur un terrain d'argile très compacte, ou dans de très grandes profondeurs, le cordage est beaucoup plus rigide et il devient très difficile de sentir à la main l'instant où le câble est saisi par le grappin. On en est réduit alors aux indications du dynamomètre qui induisent elles-mêmes assez fréquemment en erreur. On le voit marquer une tension progressivement croissante, lorsque l'on passe d'un terrain plus mou à un terrain plus dur ; si l'on commence à relever la drague, on ne tarde pas à reconnaître l'inutilité de ce travail. Aussi, lorsque les bancs d'argile ou de vase compacte n'ont pas une grande étendue, il est souvent préférable de chercher dans le voisinage un terrain plus propice aux dragages.

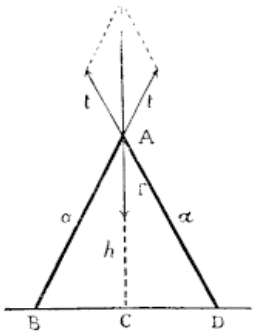


Fig. 248.

Il peut arriver aussi que le câble soit enfoncé sous le sable ou la vase, à l'endroit même où on le dragne, de sorte que le grappin ne saurait l'atteindre. Ce n'est toutefois qu'aux abords des côtes que se produit cet effet dû, soit à l'agitation superficielle des eaux qui, dans les grandes marées ou les grandes tempêtes, remue violemment le fond dans les petites profondeurs, soit aux dépôts abondants qui se forment rapidement à l'embouchure de certains fleuves ou rivières. Au large, les matières tenues en suspension dans l'eau se déposent avec une très grande lenteur et, au bout de dix ou quinze ans d'immersion, la couleur noire de l'enveloppe bitumineuse des câbles n'a souvent pas même disparu encore. Des éboulements sous-marins peuvent aussi accidentellement enfouir le câble sur une étendue de terrain plus ou moins vaste et empêcher ainsi les dragages d'aboutir. Dans ces conditions, on s'éloigne du point où on a dragué, jusqu'à ce que, suivant les cas, les sondages indiquent un changement dans la nature du fond, ou que l'on se trouve en dehors du cercle à l'intérieur duquel l'éboulement a pu se produire.

Dès que l'on suppose le câble saisi, on fait stopper la machine, si elle est en marche, et on laisse le navire abattre sous l'action du vent et des courants : la tension marquée par le dynamomètre diminue et la drague arrive peu à peu à se placer presque verticalement le long de l'étrave. On commence alors à la hisser doucement à bord, à l'aide de la machine de relèvement, en ayant soin de faire évoluer le navire à droite ou à gauche, en avant ou en arrière, de telle sorte que la drague soit toujours, autant que pos-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sible, verticale. La tension à laquelle est soumis le câble à chaque instant durant cette opération peut être calculée approximativement sans difficulté.

Soient (fig. 248) h la hauteur, à partir du fond, à laquelle est soulevé le grappin avec le double du câble,

$2a$ la longueur de la partie de câble soulevée,

T la traction exercée par le câble sur le grappin,

t la tension du câble en ce même point,

p le poids du câble dans l'eau par mètre,

m le mou.

On aura

$$m = \frac{2a - BD}{BD}$$

ou, puisque $BD = 2BC$

$$m = \frac{a - BC}{BC}$$

Mais

$$BC = \sqrt{a^2 - h^2}$$

donc

$$m + 1 = \frac{a}{\sqrt{a^2 - h^2}}$$

d'où

$$a = h\frac{m+1}{\sqrt{m^2 + 2m}}$$

Comme

$$T = 2ap$$

en substituant à a sa valeur il vient

$$T = 2ph\frac{m+1}{\sqrt{m^2 + 2m}}$$

D'un autre côté

$$t = \frac{T}{2}\frac{1}{\sin ABC} = \frac{a^2 p}{h} = ph\frac{(m+1)^2}{m^2 + 2m} \qquad (2)$$

Si le câble pouvait glisser librement sur le fond, tout le mou se rassemblerait au point où on le soulève. On aurait $m = \infty$ et par suite $T = 2ph$, $t = ph$.

Si, au contraire, le câble était fixé aux points B et D, les tensions T et t seraient supérieures à

$$2ph\frac{m+1}{\sqrt{m^2 + 2m}}$$

et

$$ph\frac{(m+1)^2}{m^2 + 2m}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Soit, comme exemple, un câble pesant 0,5 kilogramme par mètre dans l'eau, posé avec 10 p. 100 de mou. Lorsqu'il sera soulevé en double à 1 000 brasses au-dessus du fond, la traction exercée par lui sur le grappin sera de 4 440 kilogrammes, et celle du câble lui-même sera de 3 320 kilogrammes. En réalité, ces nombres sont un peu trop faibles, le câble prenant, de chaque côté du grappin, la forme, non de lignes droites, mais de deux arcs de chaînettes dont les longueurs et par suite les poids sont un peu plus considérables. La longueur de câble soulevée dans l'eau sera de 4 820 brasses et la distance à laquelle il quittera le fond, de chaque côté du navire, de 1 1/6 mille. Pour le hisser à bord, il faudra vaincre en outre le frottement de l'eau sur le câble et la résistance au déplacement de ce liquide. La traction marquée à bord par le dynamomètre comprendra enfin, en plus, le poids du grappin, de la chaîne et de la longueur de cordage immergée.

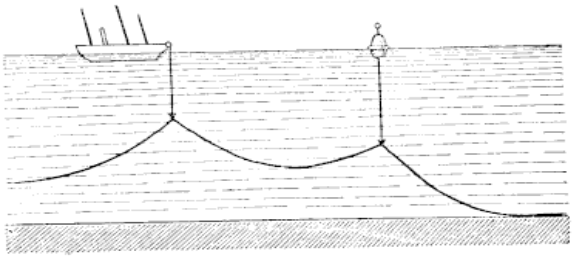


Fig. 249.

On voit par là, que si un câble a été posé avec un mou de 10 p. 100 environ, il n'est pas possible de le remonter à la surface de la mer, dans des profondeurs supérieures à 1 000 brasses, en admettant même que sa résistance mécanique n'ait pas diminué depuis son immersion. Dans ce cas, lorsque le grappin est arrivé à une certaine hauteur au-dessus du fond, on rattache le cordage de drague à une grande bouée (fig. 249) et le navire va saisir le câble à deux ou trois milles plus loin : si la longueur ainsi soulevée est encore insuffisante pour permettre de l'amener à bord, on le casse avec un grappin coupant, en retenant, s'il est possible, l'un des bouts : on retrouve l'autre bout sur la bouée.

Lorsque le grappin (fig. 250) émerge de l'eau en portant le double du câble sur l'une de ses branches, il est nécessaire de l'en dégager pour hisser le câble jusqu'à bord du navire, le grappin ne pouvant passer sur la roue de relèvement. A cet effet, on fait descendre le long de la chaîne jusqu'au grappin un homme muni de tous les outils nécessaires, et assis sur une plate-forme que retient une corde enroulée sur la poulie du porte-manteau de l'avant. On bosse cette corde dès que la plate-forme est arrivée à la hauteur des branches du grappin. On envoie en même temps à l'homme les bouts de deux filins de dragues réunis chacun à 2 ou 3 brasses de chaîne. Ces filins passent l'un sur la roue de relèvement de tribord, l'autre sur celle de bâbord, la roue du milieu étant occupée par la chaîne qui porte le grappin avec le câble.

L'homme entoure le câble sur une longueur de 60 à 80 centimètres de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaque côté du grappin, de grosses toiles d'emballage, tourne plusieurs fois l'une des chaînes autour de cette enveloppe (fig. 251) et l'amarre très

Fig. 250.

solidement à l'aide de bitord ; lorsque l'autre partie du câble est attachée de la même manière à la seconde chaîne, il coupe sur le grappin même le câble, soit à la lime, soit à la hache, en ayant soin de s'en écarter lorsque les craquements de l'armature lui en annoncent la rupture imminente, le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

coup de fouet que donne le câble au moment où il se sépare en deux étant très dangereux. On ramène l'homme à bord avec sa plate-forme, on hisse à la main le grappin en passant dans une ou deux de ses branches le double d'une corde qui s'enroule sur la poulie du porte-manteau du gaillard d'avant, et on embarque successivement quelques brasses de câble de chaque côté. On bosse les deux sections et on les relie par des fils de secours à la cabine d'expériences. Dès que le côté fautif a été reconnu, on vérifie l'état de l'autre; s'il est trouvé bon, on échange rapidement avec la terre les communications que l'on a à lui transmettre ou à en recevoir, et on le réimmerge sans tarder, en le reliant à une bouée dont on relève la position aussi exactement que possible par tous les moyens dont on dispose. Pendant ce temps, on mesure approximativement la distance de la faute au navire et on se dispose à en effectuer le relevage si les circonstances paraissent favorables.

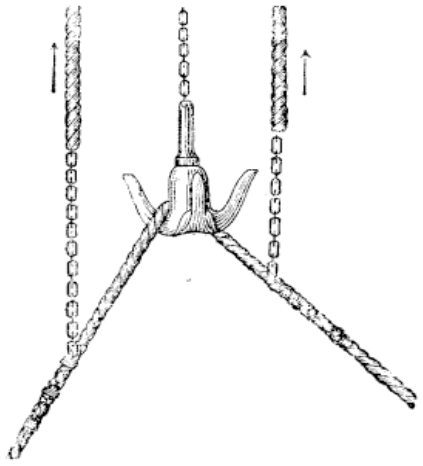


FIG. 251.

Si par suite de la trop grande tension du câble il n'était pas possible d'en amener les deux bouts à bord simultanément, on choquerait l'un d'eux pendant que l'on relèverait l'autre; dès que les essais électriques de ce dernier seraient terminés, on recommencerait l'opération en inversant les bouts.

Lorsque la tension du câble n'est pas considérable, on se borne parfois à descendre à l'avant du navire un seul filin de drague et on rattache simplement le double du câble au filin à l'aide d'une manille : on relève immédiatement après le câble en double. Cette opération est très vivement faite, mais a l'inconvénient de plier le câble à très court rayon sur l'étrier de la manille; elle risque, par suite, de l'y briser. Il est donc prudent de ne l'employer que dans les profondeurs moyennes et lorsque le peu de tension du câble écarte toute chance de rupture.

Les câbles d'atterrissement ou même intermédiaires arrivant toujours assez tendus en raison du peu de profondeur de la mer dans les parages où ils sont immergés, il est préférable de ne les soulever qu'au-dessus de la surface de l'eau, et d'armer une embarcation pour les relier aux filins de drague et les couper.

Lorsque le côté du câble trouvé en bon état a été relié, par l'intermédiaire de filins et de chaînes, à une bouée bien assise sur l'eau et ancrée dans le fond à l'aide d'un champignon disposé de manière à supporter seul

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

toute la traction ; que d'autre part une cuve a été préparée à bord pour recevoir le câble que l'on retirera de la mer, on remet en marche la machine de relèvement, et on fait manœuvrer le bâtiment de telle sorte que, sous l'action combinée de sa machine, du vent et des courants, il suive une route parallèle au tracé du câble et située même autant que possible directement au-dessus de son lit. Si l'on règle, en outre, convenablement la vitesse de relèvement, le câble reste toujours suspendu verticalement à l'avant du navire et supporte conséquemment le minimum de la tension à laquelle il doit être soumis durant le relevage. Dans les fonds rocailleux, on le trouve parfois engagé sous une roche ; en en rendant un peu à la mer et se portant soit à droite, soit à gauche de l'obstacle pour virer doucement ensuite, on arrive généralement, si l'on manœuvre avec patience et un peu d'habileté, à le dégager. Quelquefois aussi, le câble est enfoui sous des monticules de sable ou des amas de vase. On doit encore ici procéder avec lenteur et douceur ; souvent même le mouvement de tangage du navire dégage peu à peu le câble qui ne tarde pas à redevenir complètement libre. Dans certains cas particuliers cependant il peut être tout à fait impossible de l'arracher : on en est réduit alors à le casser et à le draguer de nouveau plus loin.

On continue de la sorte jusqu'à ce que le bout, s'il y a rupture complète, arrive à bord ; on mouille alors une nouvelle bouée de marque et immédiatement après, on drague le bout correspondant.

Si le conducteur a seulement une perte, en observant, pendant le relevage même du câble isolé à terre, le courant dans un galvanomètre Thomson, la déviation diminue subitement, à l'instant même où la faute émerge de la mer, bien que le câble soit ruisselant d'eau. On est averti ainsi du moment où il convient de le couper pour s'assurer si la faute est ou non à bord. Lorsque les instruments électriques ne donnent pas d'indications suffisantes sur l'instant où le relevage doit être arrêté, ou lorsqu'il y a discontinuité du conducteur en cuivre à l'intérieur de son enveloppe isolante sans que l'armature en fer soit rompue, on relève la longueur de câble nécessaire pour dépasser la faute, d'après sa position présumée résultant des expériences faites précédemment ; on coupe ensuite le câble à la première occasion favorable, épissure, coque, etc., au besoin, en pleine ligne. Si la faute est à bord, et si la section restant dans l'eau est reconnue en bon état, on épisse celle-ci sur le câble neuf tenu en réserve, et on l'immerge en se dirigeant vers la bouée que l'on a laissée sur le premier bout de câble.

Cette immersion peut se faire par l'avant, si la distance à parcourir est peu considérable, une dizaine de milles par exemple, ou si la machine de relèvement est disposée de manière à servir à volonté de machine de pose :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

il suffit, pour cela, que l'on puisse débrayer commodément le tambour de la machine à vapeur et que le frein permette d'exercer sur le câble une retenue suffisante pour que le déroulement en puisse être réglé facilement. Dans les autres cas, il est préférable d'immerger par l'arrière, sauf à ramener le câble de nouveau à l'avant, lorsque l'on arrive près de la première bouée.

Le navire ayant stoppé près de cette bouée, on prend à bord le bout du câble et, si l'état électrique des deux sections est bon, on procède sans retard à la confection de l'épissure destinée à les relier l'une à l'autre. Cette épissure est mise à l'eau avec les précautions que nous avons indiquées précédemment.

Lorsqu'une réparation doit être exécutée dans le voisinage d'autres câbles qui pourraient être atteints par les dragages, on limite le champ des opérations à l'aide de bouées de marque que l'on place préalablement en des points convenablement choisis et dont la position est soigneusement vérifiée.

FIG. 252.

La traction à laquelle est soumis un câble, durant le relevage dans de grandes profondeurs, suffit quelquefois pour amener une baisse très sensible dans son isolement : cet effet peut s'expliquer, d'une part, par l'agrandissement que subissent les fissures imperceptibles de la gutta-percha durant son étirement ; d'autre part, par l'allongement que conserve le conducteur en cuivre, lorsque la traction cesse, tandis que la matière isolante se retire et revient à sa longueur primitive. Le cuivre est dès lors obligé de prendre une forme sinueuse dans l'âme (fig. 249) ; au sommet de chaque sinuosité correspond un point faible et l'ensemble de ces points faibles constitue une perte appréciable. Un accident de cette nature est arrivé au câble de Marseille à Alger immergé en 1871 ; l'entrepreneur ayant cherché à relever, immédiatement après la pose, quelques milles de câble douteux, placés au sud de l'île de Minorque, dans des fonds de 13 à 1 400 brasses, une perte, due apparemment aux motifs que nous venons d'indiquer, se développa dans la partie du câble suspendue entre le navire et le fond de la mer pendant le relevage, et avança en même temps que le navire poursuivait l'opération. On dut renoncer à s'en débarrasser et 40 milles de câble furent sacrifiés inutilement. Cette perte, quoique s'étant aggravée depuis lors, n'est, au bout de dix-sept ans, pas suffisante encore pour avoir arrêté l'exploitation de la ligne et nécessité une réparation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

QUATRIÈME PARTIE

ESSAIS ÉLECTRIQUES DES CABLES SOUS-MARINS

RECHERCHE DES DÉFAUTS

La valeur industrielle des câbles, si l'on fait abstraction de leurs enveloppes qui ne sont destinées qu'à protéger l'âme contre les accidents extérieurs, dépend de trois quantités :

1° La résistance électrique du conducteur,

2° Celle de son enveloppe isolante, que l'on désigne communément sous le nom d'*isolement*,

3° La capacité électrostatique de l'âme.

Les essais électriques, auxquels on soumet les câbles, ont pour but la mesure de ces trois grandeurs : ils sont continus durant la fabrication et l'immersion, de telle sorte que toute altération de l'une d'elles est immédiatement reconnue et que la cause en peut être éliminée sans délai ; après l'immersion, ils servent à vérifier d'abord, si les conditions stipulées dans les contrats d'achats sont exactement remplies, et plus tard, si l'état électrique du câble ne se modifie pas. L'ensemble des données ainsi recueillies fournit des renseignements précieux, en partie indispensables même, pour la recherche ultérieure des défauts.

Nous décrirons d'abord les instruments à l'aide desquels les mesures sont faites ; nous exposerons ensuite les méthodes de mesure elles-mêmes, et en dernier lieu les différents procédés qui permettent de déterminer la position des fautes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XI

INSTRUMENTS DE MESURES

§ 1er. Galvanomètres — de Clark, — ordinaires à miroir, — astatiques différentiels, — apériodiques, — marins, — balistiques. — Figure de mérite des galvanomètres. — Shunts.
§ 2. Electromètre a quadrants de sir W. Thomson. — Principe de l'appareil. — Description : jauge, rechargeur, plaque d'induction. — Mise en station.
§ 3. Caisses de résistances — ordinaires, — pour pont Wheatstone, — à cadrans, — à arêtes de poisson, — à curseur, — de Thomson et Varley.
§ 4. Condensateurs.
§ 5. Clefs et appareils divers. — Clef à court circuit. — Interrupteur. — Double clef. — Clefs de décharge. — Commutateurs inverseurs.
§ 6. Piles.

Les instruments de mesures comprennent des galvanomètres, électromètres, caisses de résistances, condensateurs, clefs et menus appareils divers.

§ 1er. — GALVANOMÈTRES

GALVANOMÈTRE DE CLARK

Lorsque les mesures n'exigent pas une grande précision, ou que l'endroit où elles doivent être faites ne se prête pas à l'installation de galvanomètres à miroir, on peut, surtout dans les méthodes de réduction à zéro, employer des galvanomètres quelconques, pourvu qu'ils soient suffisamment sensibles ; le galvanomètre différentiel de Clark est disposé d'une manière commode pour ce genre de mesures et s'emploie également comme galvanomètre auxiliaire dans certaines recherches où l'on doit disposer de deux de ces instruments. Il se compose d'une aiguille aimantée, mobile autour d'un axe vertical supporté par des pivots et tournant à l'intérieur de deux cadres sur lesquels sont enroulés, en sens contraire, deux fils ayant la même résistance ; les extrémités de ces fils aboutissent à quatre blocs en cuivre A, B

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C, D (fig. 253), qui peuvent être reliés, à l'aide de chevilles, à une lame métallique disposée en avant de l'instrument. Cette lame sert d'enclume à un petit manipulateur dont l'axe et le butoir d'arrêt sont en communication avec deux autres bornes marquées *pont* et *manipulateur*. Deux dérivations dont la résistance est 1/99 de celle de chacun des deux circuits, permettent de diminuer la sensibilité de l'appareil. Les mouvements de l'aiguille sont rendus apparents par une deuxième aiguille très légère montée sur le même axe que la première, et mobile au-dessus d'un cadran divisé.

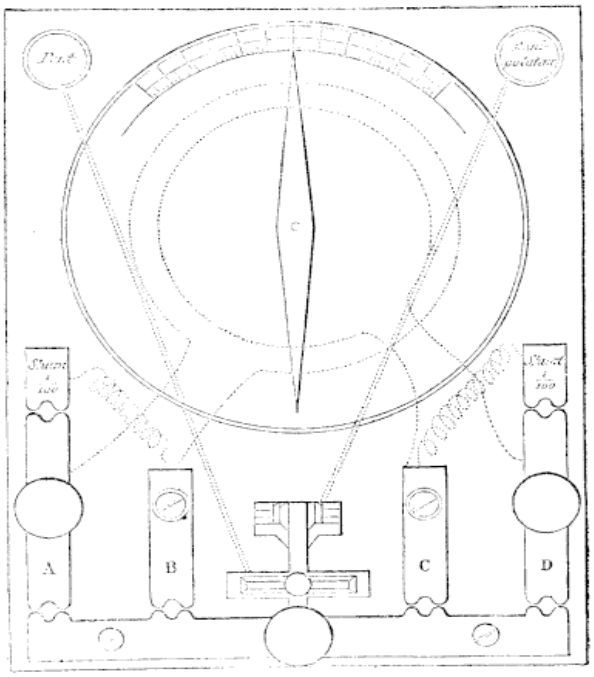


FIG. 253.

Les autres galvanomètres qui sont universellement et presque exclusivement employés dans les essais de câbles sous-marins sont ceux à réflexion ou à miroir de sir W. Thomson : ils comprennent quatre formes très distinctes.

GALVANOMÈTRES ORDINAIRES A MIROIR

Une aiguille aimantée de 8 à 9 millimètres de longueur, prise dans un ressort de montre, est fixée, à l'aide d'un peu de gomme laque, au dos d'un petit miroir circulaire d'un centimètre de diamètre environ : le poids de tout le système ne dépasse pas habituellement 6 à 7 centigrammes. Ce miroir, qui est quelquefois concave ou même formé d'une lentille plan convexe à très long foyer, est suspendu, en un des points de sa circonférence placés à angle droit de l'aimant, par un fil simple de cocon sans torsion, au centre d'une large bobine de fil recouvert de soie : la bobine est enveloppée d'un cylindre en laiton (fig. 254) dont la face antérieure est fermée par une glace et la face postérieure par une plaque métallique ; au centre de cette plaque est enchâssé un petit disque de verre à travers lequel on peut apercevoir le miroir. Le cylindre est supporté horizontalement par un trépied dont chacune des branches est munie d'une vis calante qui permet d'ajuster l'instru-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment de façon que le miroir oscille librement. Au-dessus du cylindre se trouve une tige sur laquelle peut glisser, à frottement dur, un grand aimant courbe, faiblement aimanté, dont la force directrice, combinée avec celle de l'aimant terrestre, sert à ramener l'aiguille du galvanomètre dans une position d'équilibre déterminée.

En avant de l'instrument, à une distance de 0,80 à 1 mètre, on place une règle divisée (fig. 253) que l'on peut faire glisser à frottement dur dans son

Fig. 254.

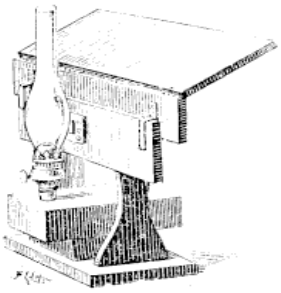


Fig. 255.

support : le pied de ce support reçoit une lampe à pétrole à mèche plate. Quelquefois la lampe porte deux mèches semblables, disposées parallèlement à une très petite distance l'une de l'autre. La lumière de la lampe passe à travers une petite fente pratiquée dans le support de l'échelle, tombe sur le miroir, s'y réfléchit et revient faire une image lumineuse assez vive sur l'échelle même. On remplace fréquemment la fente par une ouverture circulaire dans laquelle on engage un tube en cuivre de 18 millimètres de diamètre et de 5 à 6 centimètres de longueur : à l'extrémité du tube la plus voisine de la lampe, est tendu verticalement un fil de platine très fin ; à son autre extrémité, se trouve une lentille à long foyer. Le miroir qui porte l'aimant est alors un miroir plan ordinaire. L'ouverture du tube se projette sur l'échelle en un cercle lumineux traversé par une ligne noire verticale, qui est l'image du fil. Les lectures sont ainsi plus précises ; elles sont aussi plus faciles, les nombres marqués sur l'échelle, près de la ligne noire, étant vivement éclairés. Le moindre mouvement de l'aiguille et du miroir déplace l'image le long de l'échelle : il est facile de voir, d'après les lois de la réflexion de la lumière, que le chemin parcouru par l'image est égal à celui qu'aurait décrit l'extrémité d'un index ayant une longueur double de la distance du miroir à l'échelle. La disposition si ingénieuse imaginée par sir W. Thomson a ainsi le double avantage d'agir comme une aiguille d'une très grande longueur et d'un poids presque nul.

La graduation, tracée en noir sur une feuille de papier blanc glacé, ou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gravée sur verre de façon à être lue par transparence, est ordinairement en millimètres, et en comprend environ 360 de chaque côté du zéro, lequel se trouve au milieu de l'échelle. La lecture correspondant à une déviation angulaire φ de l'aiguille aimantée, donne un nombre de millimètres n proportionnel à la tangente du double de l'angle de déviation. Il est facile d'en déduire la valeur même de φ et de ses lignes trigonométriques et de se rendre compte de l'erreur commise en substituant, pour de petites déviations, le rapport $\frac{n}{n'}$ à celui des diverses fonctions des angles simples.

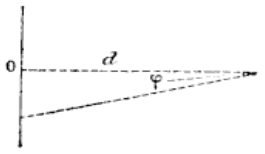


FIG. 256.

Soit en effet d (fig. 256) la distance du miroir à l'échelle, comptée en unités de même espèce que n, en millimètres par exemple. On a

$$\operatorname{tang} 2\varphi = \frac{n}{d} \tag{1}$$

d'où

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arc\,tang} \frac{n}{d}$$

et en secondes

$$\varphi = \frac{1}{2 \sin 1''} \operatorname{arc\,tang} \frac{n}{d}$$

Si l'on développe arc tang $\frac{n}{d}$ en série et que l'on se borne aux deux premiers termes du développement,

$$\varphi = \frac{206264''}{2}\left[\frac{n}{d} - \frac{1}{3}\left(\frac{n}{d}\right)^3\right]$$

et en minutes

$$\varphi = 1718',9\,\frac{n}{d}\left[1 - \frac{1}{3}\left(\frac{n}{d}\right)^2\right] \tag{2}$$

formule suffisamment précise pour des valeurs de φ ne dépassant pas 6°.

On a, d'un autre côté,

$$\operatorname{tang} 2\varphi = \frac{2 \operatorname{tang} \varphi}{1 - \operatorname{tang}^2 \varphi}$$

d'où

$$\operatorname{tang} \varphi = -\frac{1}{\operatorname{tang} 2\varphi} \pm \frac{1}{\operatorname{tang} 2\varphi}\left(1 + \operatorname{tang}^2 2\varphi\right)^{\frac{1}{2}}$$

Supprimant le signe — du radical, puisque tang φ doit être positif, et développant la quantité entre parenthèses, il vient

$$\operatorname{tang} \varphi = -\frac{1}{\operatorname{tang} 2\varphi} + \frac{1}{\operatorname{tang} 2\varphi}\left(1 + \frac{1}{2}\operatorname{tang}^2 2\varphi - \frac{1}{8}\operatorname{tg}^4 2\varphi + \ldots\right)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si l'on néglige les termes d'une puissance supérieure à la 4ᵉ et que l'on remplace tang 2 φ par sa valeur (1), on a

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{n}{2d}\left[1 - \left(\frac{n}{2d}\right)\right] \tag{3}$$

Des calculs analogues appliqués aux relations connues

$$\sin \varphi = \sqrt{\frac{1 - \cos 2\varphi}{2}}$$

et

$$\sin \frac{1}{2}\varphi = \pm \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + \sin \varphi} \mp \sqrt{1 - \sin \varphi}\right)$$

conduisent à

$$\sin \varphi = \frac{n}{2d}\left[1 - \frac{3}{2}\left(\frac{n}{2d}\right)^2\right] \tag{4}$$

et à

$$\sin \frac{1}{2}\varphi = \frac{n}{4d}\left[1 - \frac{11}{2}\left(\frac{n}{4d}\right)^2\right] \tag{5}$$

Si nous supposons que deux courants traversant successivement le galvanomètre aient donné des déviations respectives de 360 et 180 divisions, pour une valeur de $d = 800$ millimètres, leurs intensités étant proportionnelles aux tangentes des angles de déviation de l'aiguille aimantée, seront dans le rapport de

$$\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{360}{800}\right)^2} - 1}{\sqrt{1 + \left(\frac{180}{800}\right)^2} - 1} \times \frac{180}{360} = 1{,}93$$

Si l'on prend, au lieu de $\frac{\operatorname{tang} \varphi}{\operatorname{tang} \varphi'}$, le rapport $\frac{\operatorname{tang} 2\varphi}{\operatorname{tang} 2\varphi'} = \frac{n}{n'}$ on obtient 2; l'erreur relative commise sera de 0,035. Dans les cas où les mesures doivent être prises avec une certaine précision, il est par suite, préférable de faire usage des formules ci-dessus.

Pour déterminer la forme la plus avantageuse à donner aux bobines, Sir W. Thomson remarqua que l'action électromagnétique d'un élément de courant circulaire de rayon r sur un élément magnétique placé sur l'axe du cercle, est plus grand lorsque l'élément du courant est situé à l'intérieur de la surface de révolution représentée en coordonnées polaires par l'équation

$$r^2 = a^2 \sin \theta$$

que lorsqu'il est situé à l'extérieur de cette surface, a^2 désignant une constante et θ l'angle formé par le rayon vecteur de l'élément de courant avec

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'axe magnétique. L'équation en coordonnées rectilignes des sections faites dans ces surfaces par des plans passant par l'axe du galvanomètre est

$$x^2 = (a^2 y)^{\frac{2}{3}} - y^2$$

Ces sections ont à peu près la forme de la courbe représentée par la figure 257 : on s'en rapproche pratiquement, autant que possible, en enroulant le fil dans l'espace limité sur la figure par des lignes pleines; la partie la plus voisine de l'aimant reste nécessairement vide pour faire place au miroir.

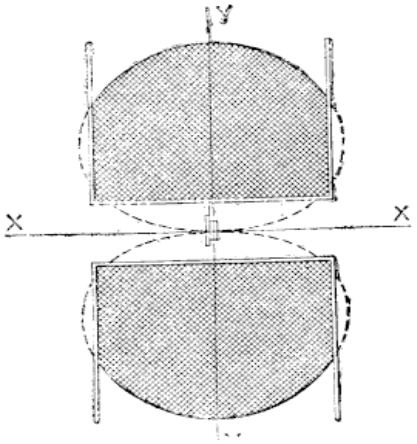


FIG. 257.

L'action électromagnétique du courant étant proportionnelle au nombre de tours de fil enroulés sur la bobine, et la résistance du circuit augmentant au contraire à mesure que le diamètre du fil diminue, on obtient l'effet utile maximum en donnant au fil de chaque couche un diamètre proportionnel à celui de la couche elle-même : les résistances des diverses couches sont alors égales. On ne peut suivre pratiquement cette règle d'une manière absolue : mais dans la construction des bobines des galvanomètres Thomson, on emploie successivement du fil de 3 ou 4 grosseurs différentes, le fil le plus gros formant les couches les plus extérieures.

Pour mettre le galvanomètre en station, on le place sur une table en bois massive, séparée de celle qui porte tous les autres instruments : lorsqu'il est très sensible, on l'installe même sur un massif en maçonnerie reposant sur de bonnes fondations, à une distance convenable des passages de voitures, de manière à éviter l'agitation provenant des trépidations du sol. On tourne l'appareil de façon à ce que l'aiguille aimantée soit placée à peu près dans le plan du méridien magnétique : on élève doucement, en évitant de la tourner, une borne placée au-dessus de la bobine, et à laquelle est attaché le fil de suspension du miroir; celui-ci repose sur deux supports, lorsqu'on enfonce à refus la borne, et l'appareil peut alors être tranporté sans danger d'un point à un autre. On règle enfin, à l'aide d'un niveau à bulle d'air, les vis calantes, de telle sorte que le miroir soit complètement libre au centre de la bobine. Ordinairement on place le galvanomètre sur une plaque d'ébonite, ou bien on dispose un petit godet de cette matière sous chaque vis calante, afin d'obtenir un isolement plus parfait.

La lampe est installée exactement en face du miroir et de manière à présenter sa flamme par la tranche, le plan de la mèche est par suite perpendiculaire à l'échelle. On arrive rapidement à la position désirée en cherchant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à apercevoir la flamme à travers le petit trou qui se trouve au dos du galvanomètre. L'index lumineux doit tomber alors en plein sur l'échelle qu'on élève ou qu'on abaisse dans son support jusqu'au point convenable. On règle la position de la lentille de manière à obtenir une image circulaire bien vive, traversée en son milieu par une raie noire, verticale, fine et très nette. On fait tourner à la main, de quelques degrés, de chaque côté du méridien magnétique, l'aimant directeur ; l'image lumineuse doit parcourir librement toute l'étendue de l'échelle, sans éprouver aucun arrêt ou ralentissement dans son mouvement. On fixe l'aimant directeur à une hauteur convenable d'après le degré de sensibilité que l'on veut donner à l'instrument : cette sensibilité diminue lorsque ses pôles sont en regard de ceux du même nom de la terre : elle augmente dans le cas contraire. Pour obtenir le maximum de sensibilité, on fait glisser l'aimant, ainsi placé, le long de sa tige, jusqu'à ce que son action contre-balance exactement celle de la terre sur l'aiguille aimantée. On le relève ensuite légèrement, afin de conserver à l'aiguille une légère force directrice capable de la ramener au zéro.

GALVANOMÈTRE ASTATIQUE DIFFÉRENTIEL DE THOMSON

Cet instrument, dont la construction repose sur les mêmes principes que le précédent, mais qui dans tous ses détails atteint un degré de perfection beaucoup plus élevé, est d'une sensibilité exquise, et demande à être manié avec de grandes précautions. On doit même éviter de circuler dans son voisinage avec des pièces en fer, telles que des clefs, couteaux, etc., les courants induits qui en résultent faisant dévier l'aiguille de ce galvanomètre.

Au miroir est fixée une tige en aluminium de 6 à 7 centimètres de longueur, qui porte à sa partie inférieure une seconde aiguille aimantée parallèle à la première ; les pôles de cette aiguille sont disposés en sens inverse de ceux de la première, et ont une intensité magnétique à peu près égale, bien que légèrement inférieure. L'action directrice de la terre sur ce système est ainsi presque nulle, mais suffit toutefois pour le ramener au zéro. Pour obtenir le maximum d'aimantation avec le minimum de poids, on remplace généralement chacune des deux aiguilles dont nous venons de parler, par un groupe de quatre petites aiguilles toutes aimantées à saturation ; les pôles de toutes ces aiguilles sont placés côte à côte dans chaque groupe, mais disposés, comme précédemment, en sens inverse dans les deux groupes. Le poids de l'équipage mobile augmentant nécessairement ainsi, on le munit d'une plaque en aluminium, en forme de girouette, pour amortir plus rapidement l'amplitude de ses oscillations.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les bobines, au nombre de quatre, sont disposées par groupes de deux les unes au-dessus des autres (fig. 258), et comprennent entre elles, les unes le premier faisceau d'aiguilles avec le miroir, les autres le second groupe d'aiguilles avec la girouette ; la tige en aluminium, de même que le fil de

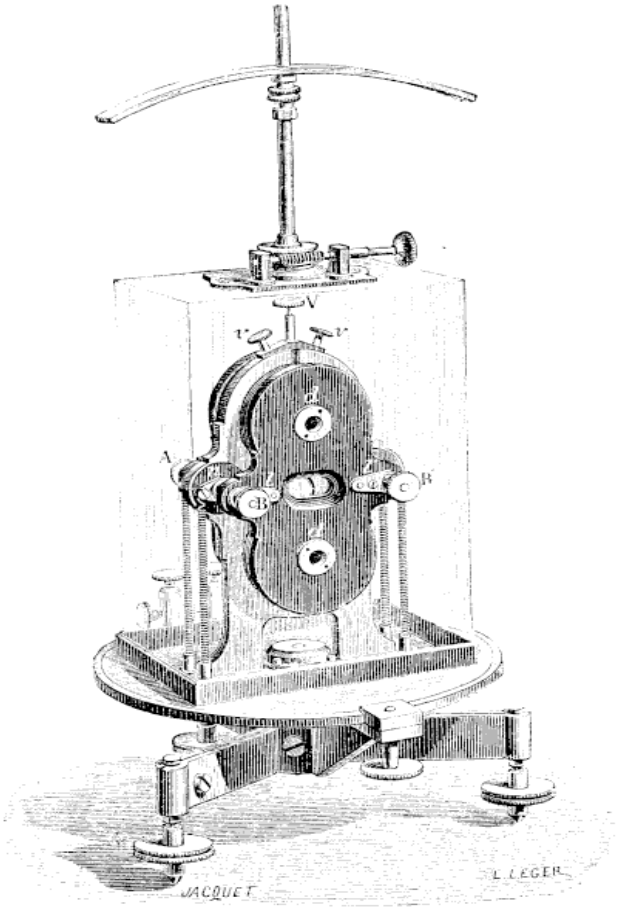


Fig. 258.

cocon, traverse un petit canal creusé dans l'épaisseur des joues des bobines. Dans les galvanomètres les plus nouveaux, les plaques de laiton sur lesquelles sont fixées les bobines sont appliquées contre la monture; des charnières permettent de les rabattre facilement en avant, ce qui rend la visite de toutes les parties mobiles des plus aisées.

Tout le système est supporté par deux colonnes de laiton qui reposent sur un socle en ébonite muni de trois vis calantes.

Le fil des bobines est en cuivre très pur et recouvert de soie imprégnée de paraffine. La couche extrême est enduite de gomme laque pour empêcher

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'humidité de pénétrer à l'intérieur. Dans les appareils destinés à servir plus spécialement de galvanomètres différentiels, où l'on recherche surtout la plus grande égalité possible dans la résistance des deux circuits, on emploie quelquefois, au lieu de cuivre, le maillechort dont les variations de résistance, pour une même différence de température, sont beaucoup plus faibles.

Le fil est enroulé en sens contraire sur les bobines inférieures et supérieures ; chaque bobine inférieure est reliée à la bobine supérieure placée immédiatement au-dessus d'elle par l'intermédiaire de petites bornes disposées de chaque côté de la plaque, au milieu de sa hauteur. Les extrémités libres des deux circuits aboutissent à quatre bornes fixées sur le socle, en avant ou en arrière de l'appareil, les deux bornes de gauche correspondant au circuit des deux bobines antérieures par exemple, et les deux bornes de droite à celui des deux bobines postérieures.

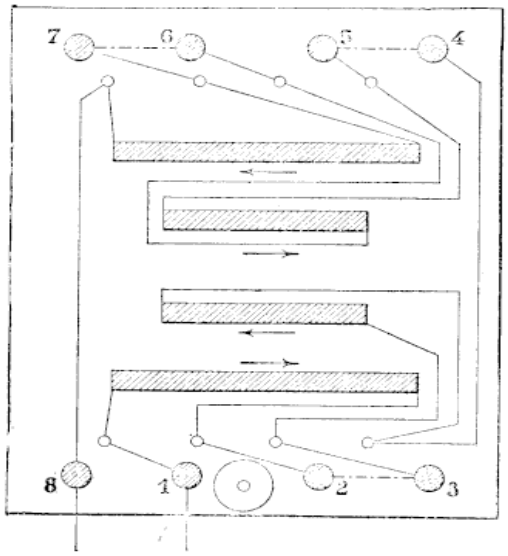


FIG. 259.

Pour que l'appareil soit différentiel, il faut que les deux circuits exercent sur les aimants des actions égales et contraires, et qu'ils aient exactement la même résistance. L'inégalité inévitable de leurs résistances se corrige facilement en donnant au circuit le plus faible quelques tours de fil de plus; mais ce supplément, au lieu d'être enroulé sur l'une des bobines, l'est sur un petit tube de laiton qui peut glisser lui-même dans un autre tube fixe, placé derrière la bobine supérieure, sur le prolongement de l'axe du miroir. En approchant ou éloignant le tube mobile de l'aimant, on arrive à égaliser les actions exercées par les deux circuits sur le système aimanté.

Lorsque l'instrument doit fonctionner comme un galvanomètre ordinaire, on réunit par un gros fil de cuivre les deux bornes du milieu : le courant entrant par la borne 1 par exemple, parcourt successivement les quatre cadres dont les actions s'ajoutent ainsi que les résistances, et sort par la borne 4.

En réunissant par de gros fils métalliques les bornes 1 et 3 d'une part, 2 et 4 de l'autre, les actions des bobines s'ajouteront encore ; mais les deux circuits étant accouplés parallèlement, la résistance du galvanomètre ne sera plus que le quart de ce qu'elle était dans le cas précédent.

Dans les galvanomètres le plus récemment construits, les deux extrémités

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de chacune des quatre bobines aboutissent à des bornes placées sur le socle de l'appareil : ces bornes sont reliées entre elles à l'aide de gros fils de cuivre. Le nombre de combinaisons que l'on peut former avec les quatre circuits est ainsi plus considérable. En réunissant par des fils les bornes 2 et 3, 4 et 5, 6 et 7, comme dans la figure 259, 1 et 8 seraient les bornes d'entrée et de sortie du courant qui traverserait alors successivement les quatre bobines. Chacune d'elles a généralement une résistance de 1 600 ohms environ.

Le socle en ébonite porte, soit deux niveaux ordinaires à bulle d'air, remplis d'alcool et placés à angle droit l'un de l'autre, soit en son centre un niveau circulaire unique permettant d'amener cette plaque exactement dans un plan horizontal.

Elle est recouverte d'une cage en verre cylindrique, ou d'une boîte métallique carrée, munie sur ses deux faces antérieure et postérieure de lames de verre. Au-dessus de la cage se trouve la tige de laiton sur laquelle peut glisser l'aimant directeur : pour ajuster avec précision l'aimant, on fait tourner, à l'aide d'un bouton, une vis tangente qui engrène avec une roue montée sur la tige et qui entraîne celle-ci et par suite l'aimant avec elle dans son mouvement.

GALVANOMÈTRES APÉRIODIQUES

Dans certaines expériences qui exigent des mesures rapides, pour la localisation des fautes notamment, on fait usage d'instruments dans lesquels les oscillations de l'aiguille aimantée sont amorties de telle façon que celle-ci vienne se placer presque du premier coup à sa position d'équilibre définitive.

Galvanomètre Thomson apériodique.

Le miroir, disposé comme précédemment, est introduit dans un manchon C (fig. 260) très court et d'un diamètre un peu supérieur seulement au sien. Le fil de cocon auquel est suspendu le miroir traverse une petite ouverture pratiquée dans la paroi du manchon ; on bouche cette ouverture avec une goutte de vernis qui sert en même temps à fixer le fil. On visse le manchon sur deux tubes en cuivre A et B, dont les extrémités a et b sont filetées et recouvertes de deux plaques de verre. Le miroir se trouve ainsi enfermé dans une petite chambre sans communication avec l'air extérieur, et dans laquelle il peut osciller librement. Tout le système est placé au centre de la bobine où le miroir occupe la même position que dans le galvanomètre ordinaire.

La résistance de l'air emprisonné dans la chambre faisant obstacle au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mouvement du miroir, lorsqu'il est dévié de sa position d'équilibre par un courant, l'aiguille au lieu de dépasser d'abord, comme dans un galvanomètre ordinaire, le point correspondant à la déviation finale, pour ne s'y maintenir qu'après une série d'oscillations, s'avance directement vers la division de l'échelle à laquelle elle devra arriver définitivement et s'y arrête à peu près immédiatement. Le même effet se produit au retour au zéro.

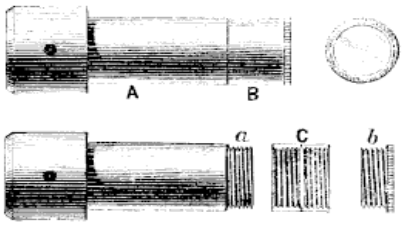


Fig. 260.

Lorsque les oscillations de l'aiguille ne sont pas suffisamment amorties par l'air, on introduit de l'alcool ou de l'eau dans l'espace compris entre les deux glaces.

On peut aussi rendre apériodique un galvanomètre à réflexion ordinaire en plaçant sur le prolongement de la suspension une plaque d'aluminium que l'on fait plonger dans un vase rempli d'eau.

Galvanomètres Deprez-d'Arsonval.

Entre les branches d'un aimant permanent A, en forme de fer à cheval (fig. 261), est fixé un tube de fer doux B qui en occupe presque toute la longueur. Un cadre C D E C, en fil de cuivre recouvert de soie, est mobile autour de deux couteaux E et J dont les arêtes coïncident avec l'axe du tube : les deux extrémités I I du fil sont ramenées sur cet axe, de façon à rester immobiles lorsque le cadre tourne et trempent dans des godets H remplis de mercure. Une aiguille E F très légère, fixée au cadre, se déplace devant un cercle gradué. Tout l'équipage mobile pèse environ 2 grammes et demi.

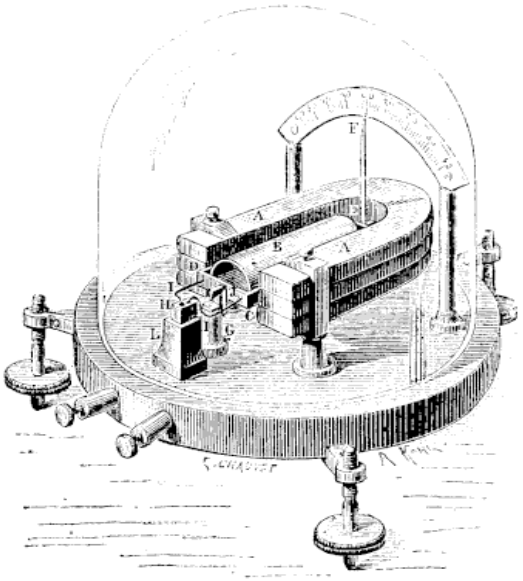


Fig. 261.

Le cadre, oscillant dans un champ magnétique très intense, développe lui-même des courants induits dont l'action magnétique tend à le ramener au repos comme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

s'il se mouvait dans un fluide de grande densité. Si l'on écarte avec la main l'aiguille de sa position d'équilibre lorsque le circuit de l'appareil est ouvert, elle tend à y revenir après une série d'oscillations plus ou moins longue ; mais si l'on réunit par un fil métallique les deux bornes placées sur le socle de l'appareil, l'aiguille revient lentement au zéro et s'y arrête sans pouvoir dépasser cette position.

MM. Deprez et d'Arsonval ont donné à leur galvanomètre encore une autre forme qui est représentée par la figure 262. L'aimant permanent A A' est vertical et les deux extrémités du cadre C C' sont reliées à deux fils d'argent ou de cuivre écroui J H, D E. Le premier J H est serré dans une pince I H qui permet d'orienter le cadre et de le suspendre à une hauteur convenable ; le second D E est relié à un ressort E F réglé par une vis G. Ces deux fils constituent à la fois l'axe de rotation du système mobile et les conducteurs d'entrée et de sortie du courant dans le cadre. Un petit miroir J permet d'amplifier à la manière ordinaire les mouvements de l'appareil.

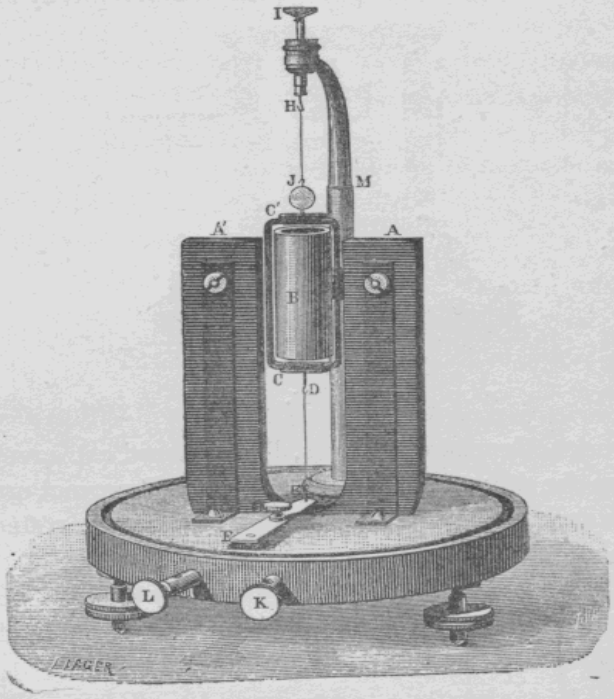


FIG. 262.

GALVANOMÈTRE MARIN DE THOMSON

Cet instrument est spécialement construit pour les essais à la mer où les mouvements de roulis et de tangage du navire et le déplacement continuel des masses de fer, pendant l'immersion des câbles, ne permettraient pas l'emploi de galvanomètres à miroir ordinaires. Il se compose (fig. 263) de deux bobines dans les joues desquelles est creusée une rainure où l'on introduit un petit cadre oblong en laiton (fig. 264) : au centre du cadre se trouve un miroir avec une aiguille aimantée, soutenu par un fil de cocon ; l'une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des extrémités du fil est fixée à l'un des petits côtés du cadre, l'autre extrémité traverse le côté opposé et est arrêtée à un ressort qui tend le fil.

Un fort aimant en fer à cheval enveloppe la partie supérieure des bobines et neutralise en grande partie l'action directrice du couple magnétique terrestre. Pour soustraire plus complètement l'aiguille aux effets des forces

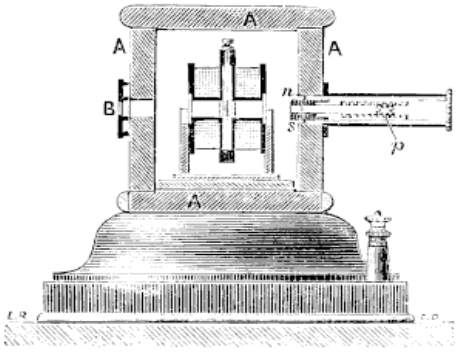


Fig. 263.

Fig. 264

magnétiques extérieures, l'instrument est enveloppé dans une cage épaisse en fer doux A ; une petite fenêtre B permet aux rayons de lumière émis par la lampe d'entrer dans l'appareil pour se réfléchir sur le miroir et en sortir ensuite.

Le réglage de précision s'effectue à l'aide de deux aimants dont les pôles de noms contraires N et S sont tournés vers le miroir : ces deux aimants,

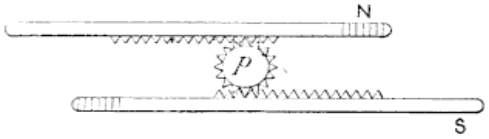


Fig. 265.

enfermés dans un tube horizontal en cuivre (fig. 265), engrènent avec un pignon p qui permet de rendre l'un ou l'autre d'entre eux prépondérant et par suite de faire tourner l'aiguille dans un sens ou dans un autre.

La résistance totale des galvanomètres marins est ordinairement de 30 000 à 40 000 ohms et celle des galvanomètres astatiques de 5 000 à 6 000 ohms.

GALVANOMÈTRES BALISTIQUES

On donne le nom de galvanomètres balistiques aux galvanomètres dans lesquels la résistance de l'air n'exerce qu'une influence négligeable sur les mouvements de l'aiguille aimantée. L'angle d'écart extrême de celle-ci, à sa

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

première oscillation, sous l'action d'un courant électrique instantané, donne ainsi la mesure exacte de la quantité d'électricité déchargée à travers le galvanomètre.

Les professeurs Ayrton et Perry ont imaginé un arrangement qui donne des galvanomètres balistiques d'une grande sensibilité. Ils disposent quarante petits aimants de longueurs variables de manière à en former deux petites sphères dans chacune desquelles tous les aimants sont dirigés dans le même sens. Les sphères sont complétées par des segments taillés dans de petites balles creuses de plomb. Ils les réunissent par une tige rigide et le système astatique ainsi obtenu est suspendu, à la façon habituelle, à l'intérieur des bobines d'un galvanomètre réflecteur à grande résistance.

FIGURE DE MÉRITE DES GALVANOMÈTRES

On caractérise le degré de sensibilité d'un galvanomètre par la résistance du circuit dans lequel une force électromotrice d'un volt produit sur l'instrument une déviation d'un degré d'arc. Cette constante se nomme la *figure de mérite* du galvanomètre. Dans les galvanomètres à miroir, les arcs étant sensiblement proportionnels aux divisions de l'échelle, on prend comme figure de mérite la résistance à travers laquelle un volt ferait dévier l'instrument d'une division. La résistance des bobines, à une température déterminée, 15° environ, et la figure de mérite de chaque galvanomètre sont généralement inscrites par le constructeur sur la caisse de l'appareil ; mais on peut les déterminer aussi directement sans difficulté, ainsi qu'on le verra plus loin.

SHUNTS

On donne le nom de *shunt* à une résistance que l'on intercale en dérivation, entre les bornes d'un galvanomètre, pour diminuer l'intensité du courant qui traverse l'instrument.

On conclut immédiatement des propriétés connues des circuits dérivés, qu'en désignant par G la résistance du galvanomètre, par S celle du shunt, la fraction du courant total qui traverse le galvanomètre est représentée par

$$\frac{S}{G + S}$$

Il faut conséquemment multiplier le courant observé par

$$\frac{G + S}{S}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour avoir le courant total : ce rapport se nomme le *pouvoir multiplicateur* du shunt.

Les bobines de résistances qui forment les shunts des galvanomètres Thomson sont ordinairement au nombre de trois, renfermées dans une caisse en bois ou en laiton (fig. 266). L'une des extrémités de chaque bobine est reliée à une large bande en laiton, l'autre à un bloc du même métal, spécial pour chacune d'elles, et que l'on peut, à l'aide de petites chevilles, mettre en communication avec une seconde bande métallique semblable à la première. Il est facile de se rendre compte qu'en plaçant la cheville entre la deuxième bande et un bloc on introduit dans le circuit la bobine qui aboutit à ce bloc. Si donc les extrémités des deux bandes sont mises en communication avec les deux bornes du galvanomètre, celui-ci formera un circuit dérivé avec la bobine en question.

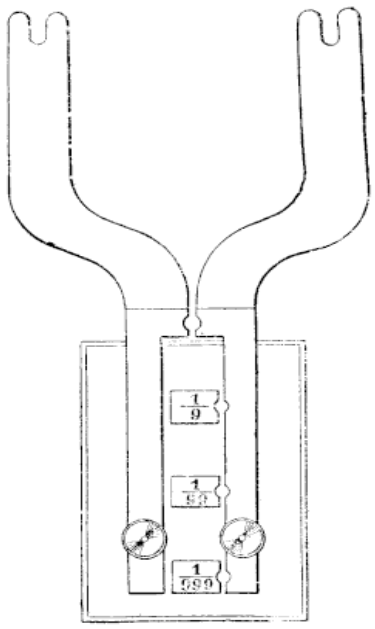


FIG. 266.

Les résistances des trois bobines sont généralement 1/9, 1/99, 1/999 de la résistance du galvanomètre; leurs pouvoirs multiplicateurs correspondants sont donc 10, 100 et 1000 et il suffit de multiplier par l'un de ces nombres la division qu'on lit sur l'échelle pour obtenir la déviation qu'eût donnée, dans les mêmes conditions, le galvanomètre sans shunt, si son échelle avait pu être prolongée suffisamment loin.

Lorsque l'on a besoin d'un shunt ayant un pouvoir multiplicateur déterminé m, on remplace la boîte ci-dessus par une caisse de résistances dans laquelle on débouche une résistance S telle que

$$S = \frac{G}{m - 1}$$

L'introduction d'une dérivation de résistance S entre les bornes d'un galvanomètre a pour effet de réduire la résistance G de cette partie du circuit à

$$\frac{G\,S}{G + S}$$

et par suite de la diminuer de la quantité

$$\frac{G^2}{G \times S}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si la résistance totale du circuit est peu considérable, l'intensité du courant peut augmenter d'une façon sensible ; le résultat obtenu, en multipliant par le pouvoir multiplicateur m du shunt la déviation de l'aiguille, serait donc trop grand. On y remédie en ajoutant au circuit une résistance précisément égale à

$$\frac{G^2}{G+S}$$

ou à

$$G\,\frac{m-1}{m}$$

Certaines boîtes de shunts sont même construites de telle façon qu'en introduisant l'une quelconque des dérivations dans le circuit, la résistance de compensation correspondante s'y ajoute d'elle-même : la figure 267 représente le schéma des dispositions adoptées à cet effet. On place une cheville entre un quatrième bloc qui est relié directement à la borne inférieure de droite et la lame voisine, lorsque l'on veut employer le galvanomètre sans aucun shunt.

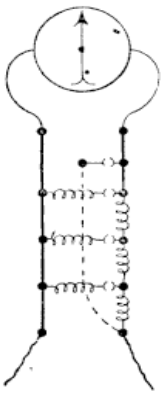


FIG. 267.

Les boîtes de shunts, pour donner des résultats corrects, doivent être maintenues à la même température que les galvanomètres pour lesquels elles sont construites. Il est essentiel, d'autre part, de toujours placer une cheville entre les deux larges lames qui relient une boîte à son galvanomètre, dès qu'une mesure est terminée, de façon à mettre ce dernier immédiatement hors du circuit. Cette précaution a pour but d'empêcher le miroir d'être projeté violemment contre les bobines, par l'effet d'un courant passager intense qui viendrait à traverser accidentellement le galvanomètre, et d'être déréglé ; l'aimantation même des aiguilles risque de se trouver ainsi détruite ou complètement modifiée.

§ 2. — ÉLECTROMÈTRE A QUADRANTS DE SIR W. THOMSON

Principe de l'appareil.

Cet appareil consiste essentiellement en une boîte plate et ronde (fig. 268), divisée en quatre compartiments A, A′, B, B′, isolés les uns des autres ; des fils métalliques relient entre eux les compartiments opposés A et A′, B et B′. Une aiguille très légère en aluminium, ayant la forme d'un 8, mobile à l'intérieur de la boîte, dans un plan parallèle à ses deux bases, est suspendue, en son centre, à un fil très fin qui porte un miroir : en avant se trou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vent une lampe et une échelle, analogues à celles des galvanomètres à réflexion, à l'aide desquelles on mesure avec une grande précision les plus faibles mouvements de l'aiguille.

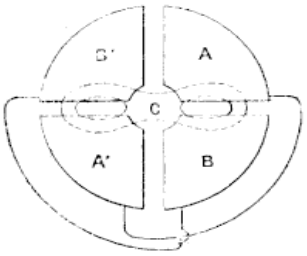


Fig. 268.

L'aiguille C étant mise en communication avec une source électrique maintenue à un potentiel élevé et constant γ, et les deux paires de quadrants A A', B B' avec les deux conducteurs dont on veut mesurer la différence de potentiel $\alpha - \beta$, on voit immédiatement que si $\gamma - \beta$ est plus grand que $\gamma - \alpha$, l'aiguille C se mettra en mouvement pour aller de A vers B, de manière à augmenter la portion de sa surface qui est opposée aux quadrants B et à diminuer celle qui est opposée aux quadrants A. Le moment de la force qui fera devier l'aiguille peut être représenté [1] par

$$\Theta = K\,(\alpha - \beta)\left[\gamma - \frac{1}{2}(\alpha + \beta)\right]$$

K désignant une constante de l'instrument. Si donc $\frac{1}{2}(\alpha + \beta)$ est suffisamment petit, les déviations seront, pour une même valeur de γ, proportionnelles à la différence de potentiel à mesurer $\alpha - \beta$. On augmente d'ailleurs la sensibilité de l'instrument en élevant le potentiel γ.

Lorsqu'on veut mesurer le potentiel d'un conducteur, on relie la seconde paire de quadrants à la terre, dont le potentiel est pris comme terme de comparaison pour toutes les grandeurs analogues, et reçoit la valeur zéro.

Nous allons étudier à présent les détails de construction de l'instrument et en décrire les parties accessoires comprenant : 1° le *rechargeur* qui sert à maintenir constante la charge électrique de l'aiguille ; 2° la *jauge* qui permet de s'assurer de la constance de la charge ; 3° la *plaque d'induction* à l'aide de laquelle on varie à volonté la sensibilité de l'électromètre.

DESCRIPTION DE L'ÉLECTROMÈTRE A QUADRANTS

Les quadrants sont fixés par des tiges en verre au centre et à la partie inférieure d'un couvercle plat de métal qui s'ajuste sur un globe en verre renversé, supporté par trois pieds munis de vis calantes (fig. 269 et 270). La surface extérieure du globe est recouverte de lames d'étain percées de quelques ouvertures ou fenêtres pour permettre de voir l'intérieur de

[1] Maxwell. *Electricity and Magnetism*, t. I, p. 273.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'instrument : le globe est rempli jusqu'au tiers environ de sa hauteur d'acide sulfurique concentré. Cet acide maintient parfaitement sec l'air intérieur et assure ainsi l'isolement parfait des diverses pièces de l'appareil ; il forme en outre, avec les feuilles d'étain et le flacon de verre, une véritable bouteille de Leyde que l'on peut charger d'électricité, et sert d'intermédiaire pour transmettre cette charge à l'aiguille. A cet effet, un fil fin en platine est attaché au-dessous de l'aiguille et supporte un poids également en platine qui plonge dans l'acide : ce poids maintient le fil tendu et, par son frottement contre le liquide, contribue à amortir les oscillations de l'équipage mobile. Le fil de platine est enfermé dans un tube de métal qui l'empêche de s'écarter beaucoup de la verticale.

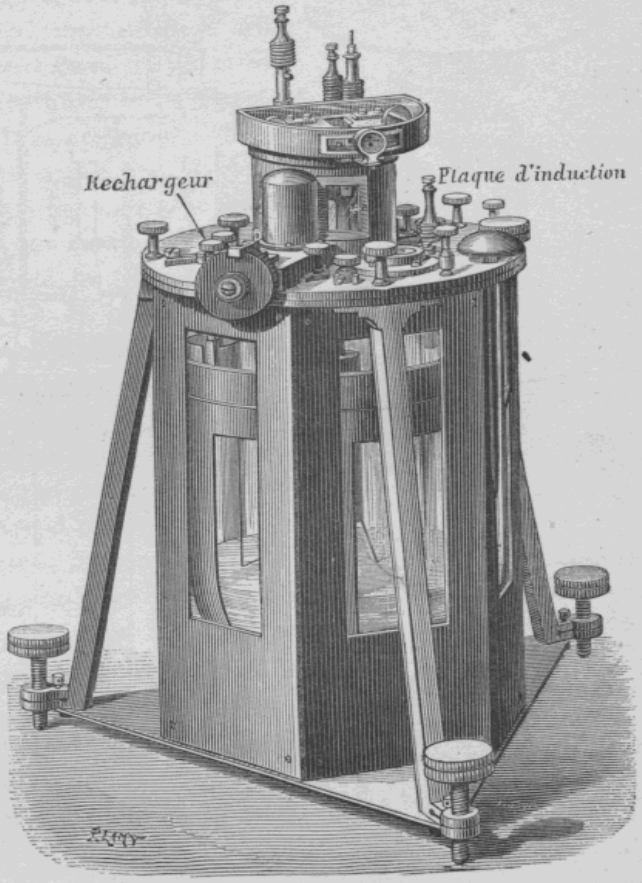


FIG. 269.

Sur le couvercle qui supporte les quadrants et au-dessus de ces derniers se trouve une boîte en laiton, munie à sa partie antérieure d'une glace plate et que l'on nomme *lanterne* (fig. 271). L'aiguille, mobile au centre de la boîte à quadrants, est soutenue par un fil de platine rigide terminé par une traverse. Deux fils simples de cocon s'enroulent d'une part sur cette traverse et de l'autre sur deux petites chevilles *c* et *d*, placées dans le voisinage du sommet de la lanterne : l'aiguille se trouvant toujours ramenée, par sa suspension bifilaire, dans un azimuth déterminé, il n'est pas nécessaire de recourir à l'emploi d'aimants directeurs. Une clef carrée permet de faire tourner les chevilles dans leurs montures, de façon à égaliser la tension des deux fils et à suspendre l'aiguille exactement au milieu de l'intervalle compris entre les faces inférieure et supérieure des quadrants. Les deux montures sont elles-mêmes portées par des ressorts *e* et *f* ; ces ressorts sont traversés par les vis *a*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et *b* dont les pointes s'appuient sur la plaque fixe qui est derrière. En faisant tourner *a* ou *b* dans un sens déterminé, le point de suspension voisin

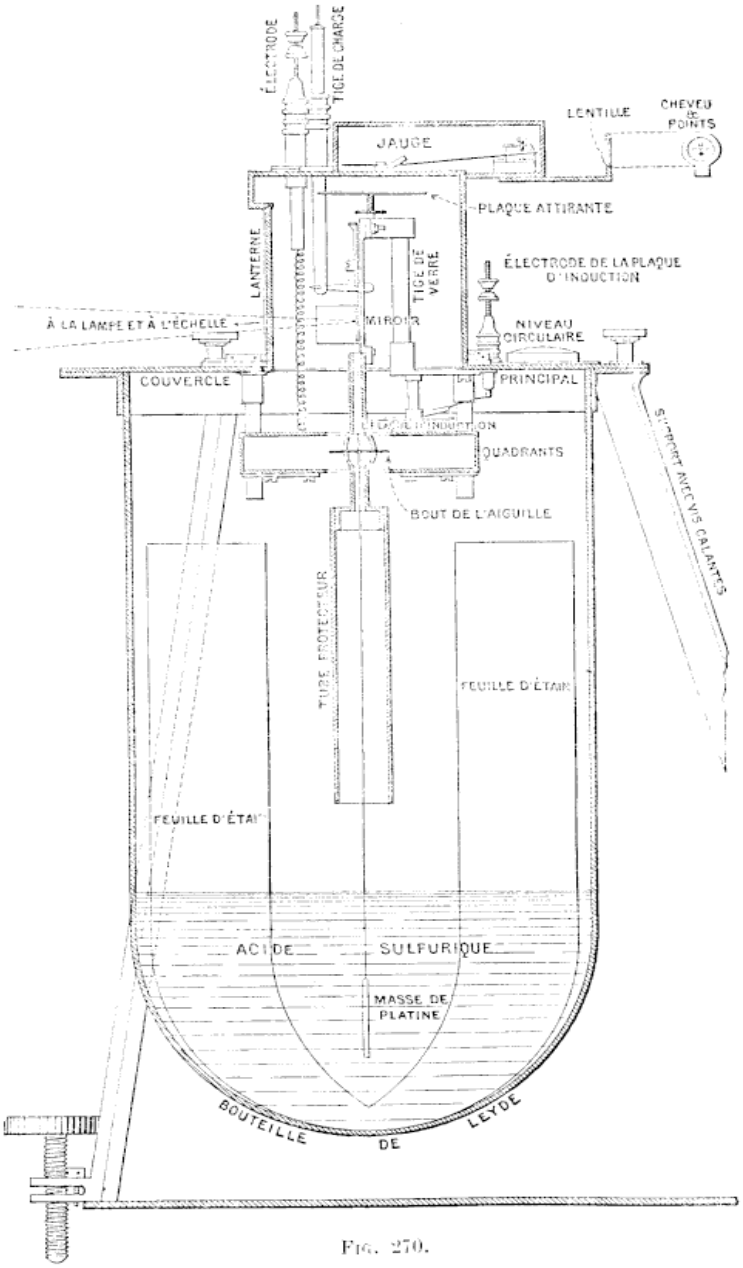


Fig. 270.

est porté en avant, ou inversement. On peut ainsi faire tourner l'aiguille sur elle-même d'un certain angle, de manière à l'amener dans la position symétrique indiquée par notre figure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Une cheville conique *h* passe entre les deux ressorts *e* et *f* et se visse dans la plaque du fond : en la vissant, on écarte l'un de l'autre les points de suspension et l'on diminue la sensibilité de l'aiguille par rapport à un couple tendant à la dévier, et inversement. L'écartement des fils peut varier ainsi de 1,27 à 3,2 millimètres.

Un miroir concave, en verre argenté de 8 millimètres de diamètre, et pesant environ 22 milligrammes, est collé sur le fil de platine qui supporte l'aiguille, en regard de l'ouverture pratiquée dans la lanterne. Les déviations sont observées, comme dans les galvanomètres à réflexion, sur une échelle divisée derrière laquelle se trouve une lampe. Toutefois, l'échelle, au lieu d'être plane, est courbée suivant un cylindre dont le fil de platine forme l'axe : l'angle de déviation peut ainsi être calculé de suite d'après le nombre de divisions de l'échelle parcourues par l'index lumineux.

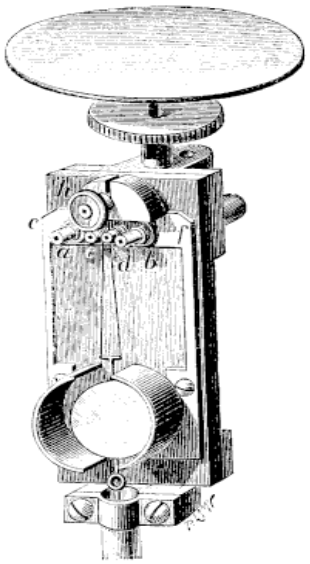


Fig. 271.

Les quadrants opposés sont reliés deux à deux par des fils métalliques et chaque paire est en communication, par l'intermédiaire d'un ressort, avec une longue tige de métal enfermée dans une colonne en ébonite qui traverse la lanterne. En soulevant ces tiges ou *électrodes*, on peut rompre leur communication avec les quadrants. On attache aux électrodes les conducteurs dont on veut mesurer la différence de potentiel.

Au-dessus de la lanterne fait saillie une troisième tige isolée que l'on peut mettre en communication avec l'armature intérieure de la bouteille de Leyde. On électrise cette armature à l'aide de quelques étincelles tirées d'un petit électrophore et on augmente ensuite la charge de la bouteille à l'aide du rechargeur qui sera décrit plus bas.

Jauge.

La jauge est un instrument accessoire qui est disposé sur l'électromètre pour permettre à l'expérimentateur de s'assurer si le potentiel de l'aiguille reste ou non constant. A cet effet, près du sommet de la lanterne, se trouve une plaque métallique horizontale fixe, que l'on voit à la partie supérieure de la figure 270 ; cette plaque est en communication avec l'acide sulfurique et par suite avec l'aiguille dont elle prend le potentiel, mais est isolée du reste de l'instrument. Un second disque, placé dans un plan exactement parallèle et à une très petite distance du premier (fig. 272), est percé d'une ouverture carrée en son milieu, en regard par conséquent du centre même du disque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

inférieur. Dans cette ouverture est mobile une petite feuille d'aluminium portée à l'extrémité d'un long bras de levier recourbé comme le manche d'une pelle ; à la naissance de l'épaulement, perpendiculairement à sa longueur, ce levier est soutenu par un fil de platine horizontal tendu par des ressorts. L'autre extrémité du levier se bifurque en forme de fourche et porte, tendu horizontalement entre ses deux branches, un cheveu noir très fin. A l'intérieur de la fourche et en avant du cheveu s'élève verticalement, fixé au massif de l'instrument, un petit pilier recouvert d'émail blanc qui porte deux points noirs superposés, séparés par un petit intervalle.

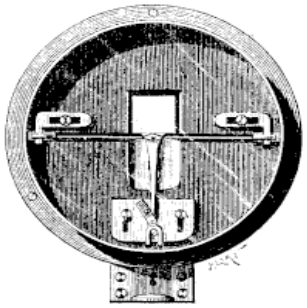


Fig. 272.

Lorsque la bouteille de Leyde est électrisée, une petite partie de la charge de l'armature intérieure se transmet au disque inférieur ; le disque supérieur et la feuille d'aluminium se chargent par induction, en sens inverse, et sont par suite attirés par le disque inférieur.

Le poids du levier est réglé de telle sorte que lorsque l'aiguille a reçu une charge déterminée, la feuille d'aluminium se trouve dans l'encadrement formé par le disque supérieur ; le levier est alors horizontal et le cheveu se projette exactement au milieu de l'intervalle blanc, entre les deux points de repère : une lentille plan convexe, placée à quelque distance en avant du pilier, permet d'observer facilement sa position. Si la charge croît, l'attraction augmente et l'on voit le cheveu se rapprocher du point supérieur ou même le dépasser ; si la charge diminue, le cheveu descend vers le point inférieur. Toute variation dans le potentiel de l'aiguille est donc aisément reconnue.

Dans chaque série d'expériences on élève ou on abaisse, à l'aide d'une vis, le disque inférieur de la quantité nécessaire pour que l'attraction électrique déterminée par la charge plus ou moins grande que l'on communique à l'aiguille, jointe au poids du levier, maintienne ce dernier dans la position d'équilibre que nous venons d'indiquer.

Rechargeur.

Le rechargeur (fig. 273) est une petite machine électrique, placée à l'intérieur de la cloche en verre ; il sert à électriser, au début, la bouteille de Leyde et à maintenir la charge de ses deux armatures constante pendant les expériences, suivant les indications fournies par la jauge. Cet appareil, basé sur le même principe que la machine électrique de Varley, se compose essentiellement de deux plaques de métal fixes, E et E' (fig. 274), appelées

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

inducteurs, portant quatre boutons g, g', h, h', contre lesquels viennent frotter successivement des lames métalliques c, fixées sur le pourtour d'un disque d'ébonite o que l'on peut faire tourner autour de son axe à l'aide d'une manivelle : les boutons h et h' sont isolés des inducteurs et en communication avec la terre.

Supposons tout l'appareil au potentiel zéro et communiquons à l'inducteur E une petite charge d'électricité positive. Cette charge induira sur la lame c une charge égale d'électricité négative, l'électricité positive correspondante se rendant à la terre au moment où la lame c touchera le bouton h. La lame c transmettra ensuite la plus grande partie de sa charge négative

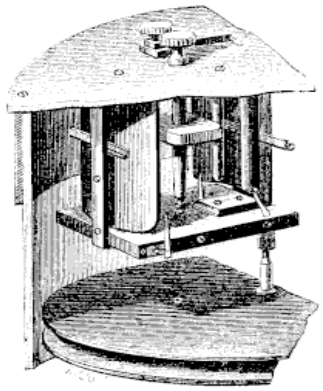


Fig. 273.

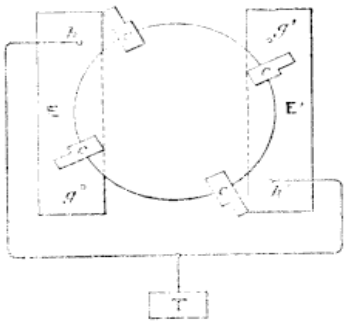


Fig. 274.

à l'inducteur E', par l'intermédiaire du bouton g' et se retrouvera elle-même presque à l'état neutre. E' induira alors sur c une charge positive, l'électricité négative correspondante s'écoulant à la terre, à l'instant où c se trouvera en contact avec h'. Cette charge positive est transmise de la même manière par c à l'inducteur E, par l'intermédiaire du bouton g.

Chaque tour de manivelle augmente ainsi la charge sur les deux inducteurs. On peut la diminuer en renversant le sens du mouvement.

L'emploi du rechargeur pendant quelques instants suffit généralement pour combler les pertes d'électricité qui se produisent dans l'appareil pendant vingt-quatre heures. L'axe du rechargeur fait saillie au-dessus du couvercle de la bouteille, de façon à pouvoir être tourné de l'extérieur.

Plaque d'induction.

Lorsque l'électrisation du corps dont on veut mesurer le potentiel est trop forte pour l'électromètre, tel qu'il est disposé ordinairement, on relie ce corps, par une électrode a (fig. 275), à une plaque mince en laiton e,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

supportée par une tige de verre *i*, et de dimension un peu moindre que le

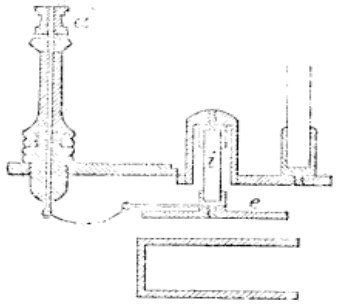


FIG. 275.

quadrant placé au-dessous d'elle : celui-ci se charge par induction à un potentiel plus faible que le corps électrisé.

MISE EN STATION DE L'ÉLECTROMÈTRE

L'instrument étant placé sur une feuille d'ébonite, au-dessus d'un solide bloc de maçonnerie, on en assure l'horizontalité à l'aide d'un niveau circulaire à alcool qui est placé sur le couvercle. On ajuste ensuite les quatre quadrants dont les faces supérieures doivent se trouver exactement dans un même plan horizontal. Les tiges de verre qui les supportent glissent, à cet effet, dans des rainures où on peut les fixer à l'aide de vis dont la tête fait saillie sur le couvercle et s'appuie sur des rondelles ovales interposées. On enroule ou on déroule les fils de suspension, en tournant dans le sens convenable les petites vis *c* et *d*, jusqu'à ce que l'aiguille soit à peu près parallèle aux faces inférieure et supérieure des quadrants. Pour amener au centre de la boîte le fil de platine dont l'axe passe lui-même par le centre de l'aiguille, on fait tourner dans un sens ou un autre une vis micrométrique qui permet d'éloigner ou de rapprocher du centre l'un des quadrants. Un trait noir gravé sur la face supérieure de l'aiguille doit, si le réglage est bon, se trouver parallèle à la fente transversale que forment les bords des quadrants.

Le globe de verre étant rempli au tiers de sa hauteur d'acide sulfurique concentré, on dispose en avant de l'instrument, normalement à la direction des rayons réfléchis, l'échelle et sa lampe, de manière à obtenir une image parfaitement nette au milieu de l'échelle. Si l'appareil est bien vertical, le tube de garde ne doit toucher en aucun point le fil de platine qui est suspendu au-dessous de l'aiguille, et celle-ci doit osciller librement ; on reconnaît facilement que ces conditions sont remplies si l'aiguille effectue des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

oscillations de même période et d'amplitudes régulièrement décroissantes de part et d'autre d'une position d'équilibre quelconque.

On tourne la troisième tige isolée qui fait saillie au-dessus de la lanterne pour l'amener en contact avec l'armature intérieure de la bouteille de Leyde : on lui communique une petite charge d'électricité et on détourne de nouveau la tige pour qu'aucune déperdition ne puisse s'effectuer par cette voie. On met en mouvement le rechargeur jusqu'à ce que la jauge indique que le potentiel convenable est atteint. Lorsque l'intérieur de l'appareil est bien sec, et que la poussière a été soigneusement enlevée, on peut, avec un verre de bonne qualité, avoir une perte ne dépassant pas 1/2 p. 100 en vingt-quatre heures.

On s'assure de la suspension symétrique de l'aiguille par les fils, en reliant les bornes extérieures des quadrants alternativement aux pôles de noms contraires d'un élément de pile et observant les différences des déviations produites sur l'échelle, pour des inclinaisons diverses de l'appareil. Si cette différence diminue, par exemple, lorsque l'on élève l'un des côtés de l'instrument, le fil de suspension correspondant doit être allongé : on tourne à cet effet légèrement la vis c ou d. On achève le réglage en agissant sur les vis a, b, h, de manière à faire paraître le trait noir gravé sur l'aiguille exactement au milieu de l'intervalle compris entre les bords des quadrants, lorsque l'appareil n'est plus soumis à aucune influence électrique et se trouve de niveau. L'aiguille, étant placée alors à la plus grande distance possible de tous les quadrants, atteint son minimum de sensibilité.

L'échelle de l'électromètre porte ordinairement 720 divisions, mais, à l'inverse de celle du galvanomètre, le zéro se trouve à l'une de ses extrémités ; le réglage se fait tantôt sur la division zéro, tantôt sur la division 360 qui occupe le milieu de l'échelle.

§ 3. — CAISSES DE RÉSISTANCES

On donne le nom de *caisses de résistances* à des boîtes qui contiennent une série de bobines de résistances variées et disposées de manière à pouvoir être introduites facilement dans un circuit ou à en être retirées de même.

Le fil des bobines est ordinairement en maillechort, alliage composé de

Cuivre.	4	parties
Nickel.	2	—
Zinc.	1	—

dont la résistance ne varie que de 0,00044 par degré centigrade. Quelquefois même il est en platine, le coefficient de variation de la résistance élec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trique de ce métal, par degré centigrade, n'étant que de 0,00031, soit plus de dix fois plus faible que celui du cuivre.

Le fil est isolé par une double enveloppe de soie et la bobine garnie est plongée dans un bain de paraffine chaude qui lui conserve son isolement parfait. L'enroulement du fil est fait en *double* sur un cylindre creux en ébonite, de façon à annuler l'extra-courant qui se développerait dans une bobine à enroulement simple, au passage de chaque courant ordinaire.

Les extrémités voisines des fils des diverses bobines (fig. 276 et 277) sont

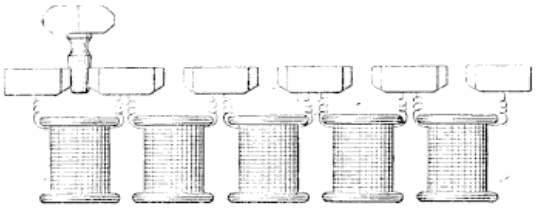


Fig. 276.

Fig. 277.

fixées, deux par deux, à une série de blocs en laiton placés sur le couvercle en ébonite de la boîte : les bouts de ces blocs sont taillés de façon à pouvoir être mis en communication les uns avec les autres, par des chevilles de même métal garnies de têtes en ébonite, lorsqu'on les enfonce dans l'intervalle qui les sépare. Le courant arrivant par le dernier bloc de la caisse, passe dans toutes les bobines qui ne sont pas mises en court circuit par l'introduction de chevilles dans les trous correspondants. La résistance de la caisse est donc égale à la somme des résistances débouchées : le nombre qui représente la résistance de chaque bobine étant gravé sur le couvercle, entre les deux blocs auxquels elle aboutit, une simple addition donne la valeur cherchée.

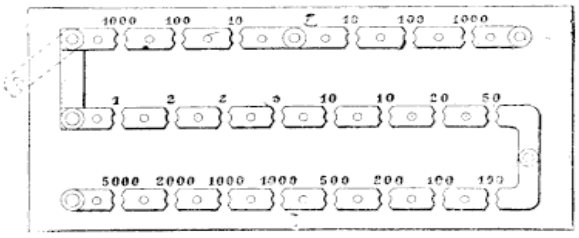


Fig. 278.

Les caisses de résistances les plus usitées dans la télégraphie sous-marine sont disposées de manière à se prêter commodément à l'installation d'un pont de Wheatstone. Elles portent à cet effet trois rangées de blocs disposées comme l'indique la figure 278 ; la première rangée comprend deux séries de résistances de 10, 100, 1 000 ohms chacune, se faisant suite l'une à l'autre ; les blocs extrêmes des deux séries et celui qui les réunit portent des bornes munies de contre-écrous auxquelles on attache les fils de communication.

La seconde et la troisième rangées, se faisant suite l'une à l'autre, correspondent à des bobines dont les résistances combinées de diverses manières permettent de reproduire facilement tous les nombres entiers, de 1 à 9 999 :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au premier et au dernier blocs de ces deux rangées sont également fixées des bornes. Les deux premières rangées sont reliées ensemble par une forte lame de cuivre que l'on serre entre les deux bornes placées en regard l'une de l'autre : on peut interrompre à volonté la communication en retirant la lame. Les branches de comparaison du pont sont formées par les deux séries de la première rangée ; on peut, par des combinaisons faciles à imaginer, leur donner les valeurs relatives suivantes :

$$\frac{1}{100} \quad \frac{1}{10} \quad 1 \quad 10 \quad 100$$

Lorsque l'on a besoin de former des rapports plus compliqués, on se sert de caisses de résistances auxiliaires.

Il est essentiel, avant de faire usage d'une caisse, d'enlever avec soin toute la poussière qui se trouve sur le couvercle et qui suffirait à former des dérivations appréciables entre les divers blocs. On se sert à cet effet d'un petit morceau de bois, entouré de flanelle, que l'on introduit dans tous les coins et on termine l'opération par quelques coups de plumeau. Les chevilles doivent être propres et brillantes : on les nettoie en les frottant avec du papier de verre à grain fin. On opère de même avec le morceau de bois entouré de ce papier pour les parties évidées des blocs dans lesquelles pénètrent les chevilles. Pour obtenir un bon contact, on doit faire tourner celles-ci sur elles-mêmes, en même temps qu'on les enfonce ; on les retire de la manière inverse. Avant de commencer un essai, on s'assure toujours rapidement, en touchant les têtes de toutes les chevilles, qu'aucune d'elles n'est desserrée.

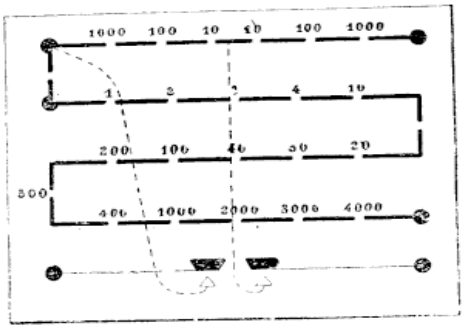


FIG. 279.

On ajoute quelquefois aux caisses de résistances deux manipulateurs permettant, l'un d'établir ou de supprimer le courant, et l'autre d'introduire ou

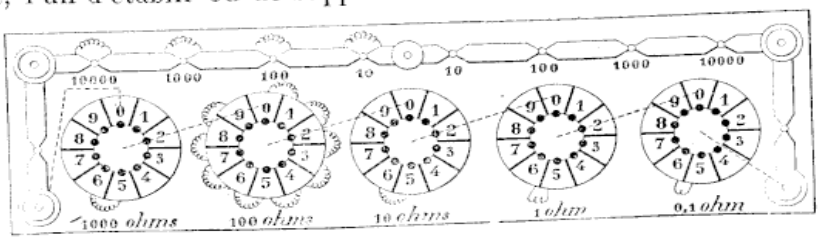


FIG. 280.

non, à volonté, le galvanomètre dans le circuit : on donne alors à l'appareil la forme représentée par la figure 279.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Une forme de caisse très commode est celle dite *à cadrans* (fig. 280 et 281). Les branches de comparaison sont disposées comme à l'ordinaire, mais comprennent quatre bobines dont les résistances sont de 10, 100, 1 000, 10 000 ohms ; d'où un plus grand nombre de combinaisons possible. On y a ajouté en outre un bloc supplémentaire auquel n'aboutit aucune bobine, et

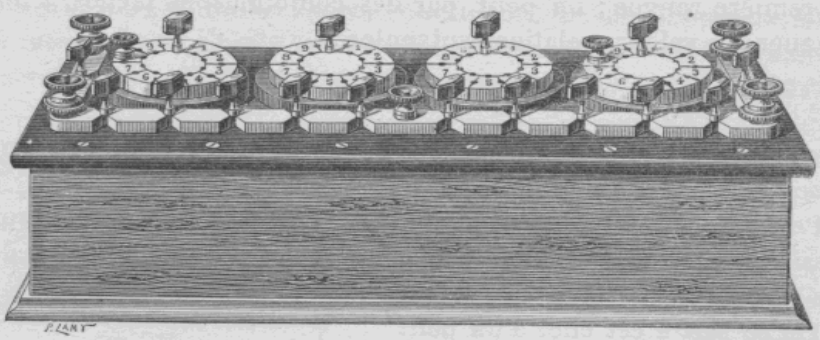


FIG. 281.

qui permet de donner la valeur ∞ à la résistance de la branche correspondante. Chaque cadran se compose d'un disque de laiton entouré d'un anneau coupé en 10 segments. Ces segments sont reliés chacun au suivant par une bobine dont la résistance est la même dans chaque cadran et qui, dans les différents cadrans, est de 0,1 — 1 — 10 — 100 — 1000 ohms respectivement.

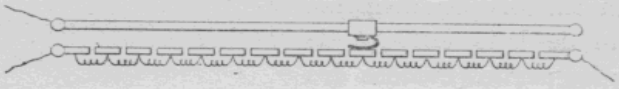


FIG. 282.

Le disque de chaque cadran étant relié au segment zéro du cadran suivant, on voit qu'il suffit de placer une cheville entre le disque et un segment pour introduire dans le circuit une résistance égale au nombre d'unités marquées sur ce segment : la manœuvre est ainsi plus rapide et les lectures plus faciles.

Les caisses dites à *arêtes de poisson* sont construites d'après le même principe. Les blocs, au lieu d'être disposés circulairement autour d'un disque central, sont placés parallèlement à la longueur d'une lamé de laiton qui est reliée au bloc zéro de la rangée suivante.

Caisses de résistances à curseur.

Les caisses de résistances *à curseur* se divisent en deux catégories. Dans les unes, on fait glisser le long d'une tige métallique un curseur muni d'un ressort qui frotte sur des blocs auxquels aboutissent les extrémités des fils des bobines de résistances (fig. 282) ; dans les autres, on tourne une simple

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

manette dont l'axe se trouve en communication successivement avec les extrémités de toutes les bobines de la caisse (fig. 283).

Sir W. Thomson et M. Varley ont imaginé un arrangement plus complet, très commode pour faire varier rapidement le rapport de deux résistances dont la somme doit rester constante ; la figure 284 en donne le principe et les figures 285 et 286 la disposition pratique. Le courant de la pile arrive à un curseur M embrassant deux bobines et se partage le long des deux

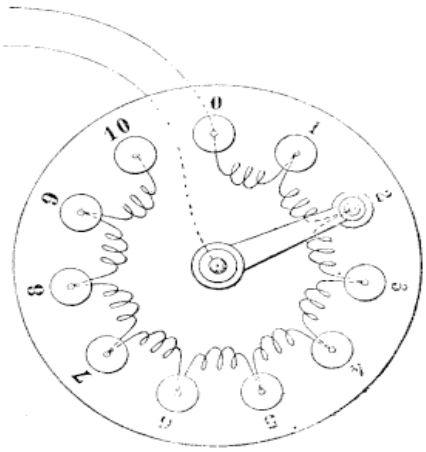


Fig. 283.

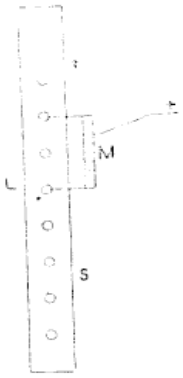


Fig. 284.

branches S et *s* de L : lorsque M se déplace vers *s* d'une division, S augmente de la résistance d'une bobine et *s* diminue d'une quantité égale.

Ordinairement, la boîte L comprend 101 bobines de 1 000 ohms de résistance chacune ; le levier tournant est double et ses deux bras sont en communication avec les deux extrémités d'une caisse de résistances à curseur simple qui lui sert pour ainsi dire de vernier et qui est composée de 100 bobines de 20 ohms de résistance chacune. La résistance en circuit est ainsi toujours de 100 000 ohms, les deux bobines embrassées par la manivelle double de L et dont la résistance est de 2 000 ohms se trouvant en circuit parallèle avec le curseur M dont la résistance est de

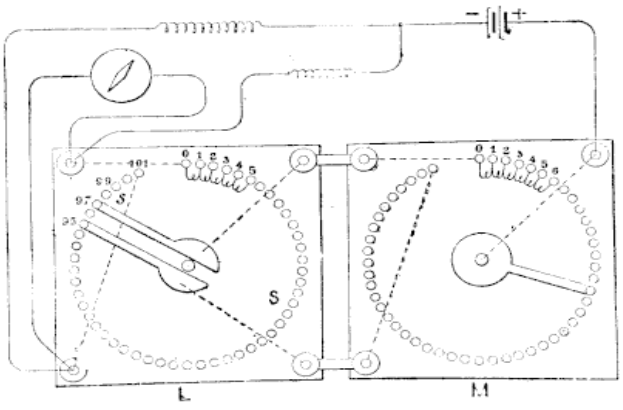


Fig. 285.

32

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2 000 ohms également : la résistance composée de ces deux lignes est donc de 1 000 ohms. En y ajoutant les 99 bobines de 1 000 ohms restantes de S et *s*, on a exactement 100 000 ohms.

Lorsque cette caisse forme les deux branches de comparaisons d'un pont de Wheatstone, l'application des lois de Kirchhoff fait reconnaître facilement que les résistances de ces branches sont celles comprises entre la manivelle double et les contacts 0 et 101 de la première série de bobines, augmentées de la moitié des résistances correspondantes comprises, dans la seconde série, entre le levier et les contacts extrêmes. Ces dernières bobines portant un numérotage gradué de 0 à 100, il suffit de multiplier par 10 le nombre marqué par le levier, ainsi que son complément à 100, pour obtenir les résistances à ajouter à celles de la première série. Dans la position indiquée par notre dessin, la résistance de la branche S serait de 95 680 ohms, et celle de la branche *s* de 4 320 ohms.

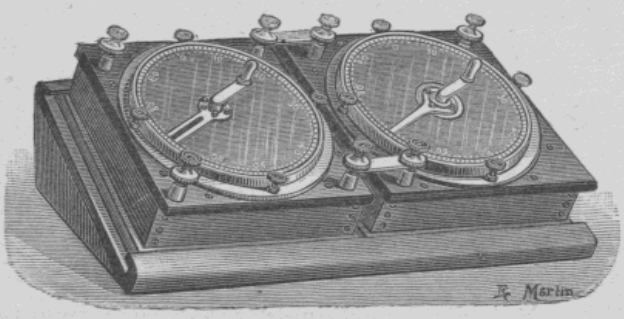


Fig. 286.

Si l'on intervertissait les deux fils qui relient les deux bras du curseur double au vernier, on obtiendrait la résistance de l'une des branches de l'appareil en *ajoutant* les lectures prises sur les deux caisses, *dans le sens de leur graduation ;* la résistance de l'autre branche serait représentée par la somme des deux lectures prises dans le sens inverse des graduations ou par le complément à 100 000 du premier nombre. Dans la position de la figure 285, on aurait *alors* pour l'une des branches 95 320 ohms et pour l'autre 4 680 ohms.

§ 4. — CONDENSATEURS

Les condensateurs sont composés de feuilles d'étain isolées les unes des autres par du papier paraffiné ou du mica recouvert d'un vernis, et enfermées dans une boîte en laiton recouverte d'une plaque en ébonite (fig. 287). Les feuilles d'étain de rang pair sont reliées ensemble, celles de rang impair le sont également : on forme ainsi deux systèmes correspondant aux deux armatures d'une bouteille de Leyde et qu'on met en communication avec deux blocs en laiton placés sur le couvercle en ébonite. Ces blocs portent des bornes auxquelles on attache les fils de secours ; leurs extrémités sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

assez rapprochées pour que l'on puisse introduire une cheville entre elles, de façon à mettre l'instrument en court circuit.

On doit toujours avoir soin de mettre cette cheville en place, dès que le condensateur n'est pas en service, afin de faciliter la combinaison des charges d'électricité qui peuvent avoir pénétré jusqu'à une certaine profondeur dans le diélectrique et de ramener ainsi plus promptement l'appareil à l'état neutre.

La capacité électrostatique des condensateurs en usage dans la télégraphie

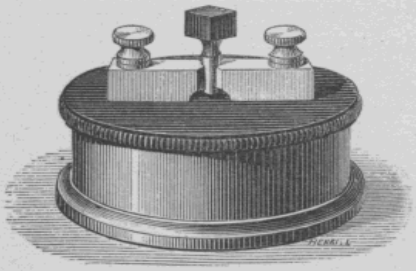


Fig. 287.

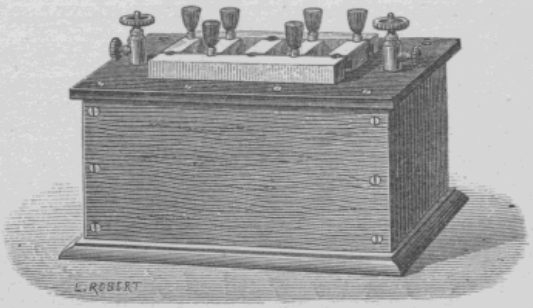


Fig. 288.

sous-marine est ordinairement de 1/3 de microfarad. On en construit cependant qui (fig. 288), par l'insertion de chevilles, peuvent donner diverses capacités comprises entre 0,05 et 1 microfarad.

On peut aussi former des combinaisons variées en accouplant de différentes manières plusieurs condensateurs. Si leurs capacités individuelles sont a, b, c....., celle C du système obtenu, en les réunissant tous en surface, est

$$C = a + b + c + \cdots$$

Si, au contraire, on place tous les condensateurs en cascade les uns à la suite des autres, la capacité C du système sera

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \cdots$$

§ 5. — CLEFS ET APPAREILS DIVERS

CLEFS A COURT CIRCUIT. — INTERRUPTEUR

La clef à court circuit (fig. 289) se compose d'un large ressort dont une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

extrémité est fixe et en communication permanente avec une borne en laiton montée sur un socle en ébonite ; la seconde extrémité, pourvue d'une poignée également en ébonite, peut se mouvoir entre deux contacts, l'un supérieur en platine, l'autre inférieur en ébonite. Le contact en platine est en communication avec la borne antérieure de l'appareil : à l'état de repos, le ressort appuie contre ce contact. Si ces deux bornes sont reliées par des fils aux deux bornes d'un galvanomètre, en même temps que la boîte de shunts, le courant ne passera dans le galvanomètre que lorsque l'on tiendra abaissé le ressort de la clef. On ne s'expose pas ainsi à oublier de replacer dans la caisse de shunts la cheville de court circuit et à lancer dans le galvanomètre, par inadvertance, un courant susceptible de le déranger.

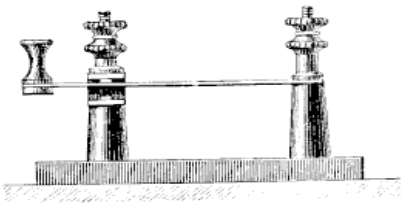


Fig. 289.

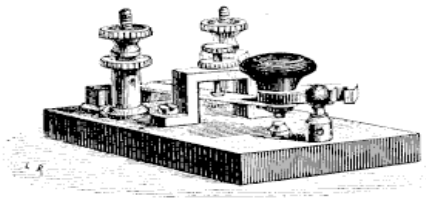


Fig. 290.

L'interrupteur (fig 290) est un appareil construit sur le même principe ; la partie antérieure du ressort est pourvue d'un arrêt qui ne lui permet pas de se relever quand il a été abaissé, si l'on a soin de tourner en même temps sur lui-même le bouton en ébonite.

DOUBLE CLEF

Cet instrument s'emploie soit pour inverser les pôles d'une pile, soit pour renverser le sens du courant dans le galvanomètre, de manière à lire toujours les déviations sur le même côté de l'échelle : on évite ainsi les erreurs dues à un défaut de symétrie dans la position de l'échelle. Deux ressorts, semblables à ceux de la clef à court circuit, sont fixés, par l'une de leurs extrémités, à des colonnes en ébonite et communiquent en permanence avec des bornes métalliques qui les maintiennent dans leur position ; leur extrémité opposée est munie d'un bouton en ébonite et vient buter, si l'on appuie le doigt sur ces boutons, contre des arrêts en platine fixés à une traverse en laiton ; cette traverse, portée par des colonnes isolantes, est placée *sous* les ressorts et munie d'une borne. Une traverse semblable est placée *au-dessus* des ressorts, au milieu de leur longueur ; dans l'état normal, les deux ressorts sont appliqués contre cette deuxième traverse. Deux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chevilles en ébonite munies d'un manche permettent de maintenir les ressorts abaissés en permanence.

Il est facile de voir (fig. 291) que si l'on attache les pôles positif et négatif d'une pile respectivement aux bornes 1 et 2 d'une double clef, la terre en 4 et le fil conducteur en 3, on enverra dans le fil le courant positif de la pile, en même temps qu'on en mettra le pôle négatif à la terre, si l'on abaisse le ressort de gauche ; on enverra, au contraire, dans le fil le courant négatif de la pile dont le pôle positif sera à la terre, si l'on abaisse le ressort de droite.

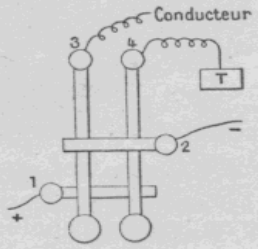


Fig. 291.

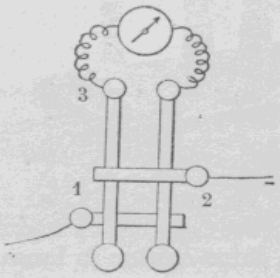


Fig. 292.

On voit de même (fig. 292) qu'en reliant 3 et 4 aux bornes d'un galvanomètre, si 1 est en communication avec le pôle positif de la pile et 2 avec le pôle négatif, le courant circulera dans le galvanomètre en passant de 3 à 4, si l'on abaisse le ressort de gauche. Si l'on renverse le sens du courant, de telle sorte que la borne 1 soit maintenant en communication avec le pôle négatif de la pile, le courant circulera encore dans le galvanomètre en passant de 3 à 4, si l'on abaisse le ressort de droite. La lame transversale supérieure forme, en outre, clef de court-circuit pour le galvanomètre, de telle sorte que l'on peut se dispenser quelquefois d'employer cette clef spéciale avec la double clef.

CLEFS DE DÉCHARGE

Il existe un assez grand nombre de modèles de clefs de décharge : nous nous bornerons à en décrire les trois principaux.

La clef de Webb (fig. 293) consiste en un levier de laiton horizontal, mobile autour de l'une de ses extrémités et dont la course est limitée par deux contacts portés par deux colonnes en ébonite ; il se termine en avant par deux entailles en forme d'échelons et est constamment sollicité par un ressort à se soulever. Un second levier vertical en ébonite peut tourner

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

autour d'un axe placé sur le socle de l'appareil et est poussé en avant par un ressort ; il porte une languette qui peut s'engager dans l'une ou l'autre des entailles du premier levier. Lorsque l'on presse sur celui-ci à fond, à l'aide d'un bouton en ébonite placé vers son extrémité, l'entaille supérieure est saisie par la languette et le levier reste en communication avec le contact inférieur ; si l'on ramène légèrement en arrière le levier d'ébonite, de

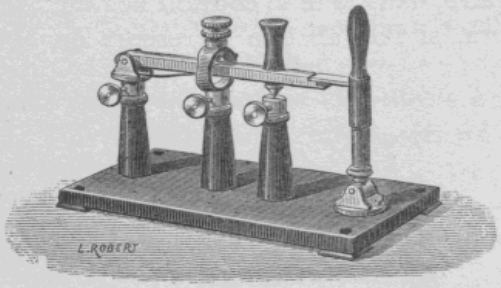


Fig. 293.

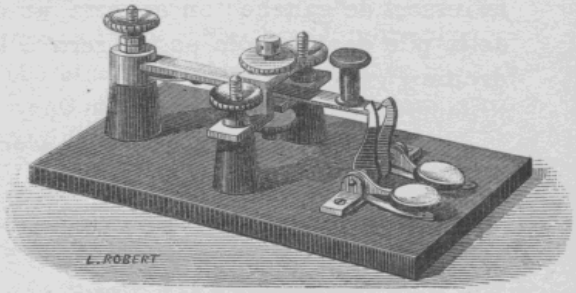


Fig. 294.

manière à faire sauter la languette du premier au second échelon, le levier de laiton se soulève un peu et reste isolé entre les deux contacts ; si enfin le levier en ébonite est ramené un peu plus en arrière et rabaissé jusque sur son socle, le levier de laiton échappe entièrement à la languette et vient buter contre le contact supérieur.

Dans le modèle imaginé par M. Kempe (fig. 294), deux touches voisines de l'extrémité libre du levier en laiton servent à mettre en mouvement deux crochets ou cames en laiton, isolés par des tiges en ébonite. La came de droite est un peu plus haute que celle de gauche et disposée de façon que le levier occupe une position intermédiaire entre les deux contacts, lorsqu'il est retenu par elle : la hauteur de la seconde came est telle que le levier touche le contact inférieur lorsqu'il est en prise avec elle. Si l'on appuie sur la touche de gauche, le levier échappe à la came correspondante, mais se trouve arrêté par celle de droite : il est donc isolé de ses deux contacts. Si l'on appuie sur la touche de droite, le levier s'élève jusqu'à ce qu'il rencontre le contact supérieur.

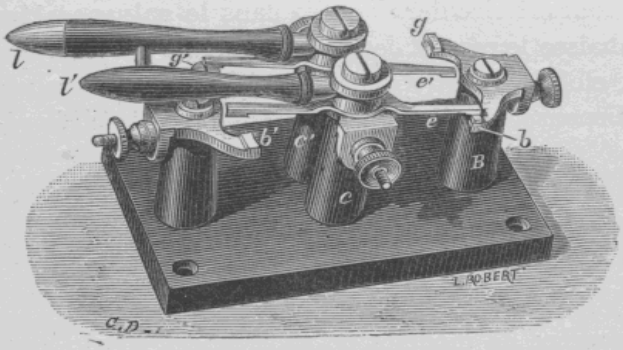


Fig. 295.

La came de droite porte, en outre, une petite tige horizontale qui s'avance jusqu'en face de la seconde came. Il résulte de cette disposition que si la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

came de droite est abaissée d'abord, elle entraîne la seconde dans son mouvement et le levier peut sauter directement du contact inférieur au contact supérieur. Cette tige n'intervient pas dans le jeu de l'appareil lorsque les deux cames sont soulevées successivement dans l'ordre contraire.

M. Rymer Jones a fait construire un excellent modèle de clef de décharge et qui est fréquemment employé dans d'autres expériences encore (fig. 295). Deux lames de cuivre e et e', recouvertes de platine par dessous à leur extrémité libre et prolongées par des manches en ébonite, peuvent tourner dans un plan horizontal autour de colonnes également en ébonite c et c' : le manche de droite porte une petite cheville perpendiculaire à sa longueur et entraîne par suite le second manche lorsqu'il est en contact avec lui et qu'on le pousse de droite à gauche. Deux bornes métalliques sont placées sur les deux axes de rotation et se trouvent ainsi en communication permanente avec les lames e et e'. Une colonne spéciale en ébonite porte une troisième borne et une pièce métallique munie de deux contacts platinés b et g, sur lesquels viennent frotter, au bout de leur course, les extrémités des lames e et e'. Les communications étant établies, comme le montre la figure 296, avec une pile, un câble et un galvanomètre, on voit que si l'on porte le manche l vers la gauche, la pile charge le câble sans communication possible avec le galvanomètre : en ramenant l un peu vers la droite, le câble reste isolé et n'est exposé qu'aux pertes qui peuvent se produire le long de la colonne en ébonite B ; si enfin on pousse l' à droite jusqu'à fond, le câble se décharge à la terre à travers le galvanomètre.

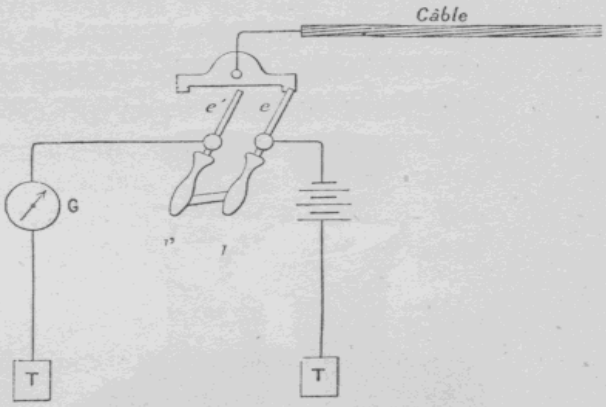


FIG. 296.

Dans les clefs de Jones les plus récentes, les lames e et e' sont prolongées sous les manches en ébonite et peuvent venir frotter sur deux autres contacts b' et g' reliés à une quatrième borne (fig. 295). Toute la partie métallique de l'instrument est symétrique par rapport au plan passant par les axes des colonnes c et c'. Cette clef peut, dans bien des cas, remplacer deux clefs ordinaires et rendre ainsi les manœuvres plus faciles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

COMMUTATEURS INVERSEURS

Pour changer le sens du courant d'une pile, on se sert fréquemment d'un commutateur inverseur formé de quatre quadrants en laiton, très épais, vissés sur quatre colonnes en ébonite, très rapprochés les uns des autres, sans toutefois se toucher (fig. 297). Des trous à peu près demi-circulaires sont percés en regard les uns des autres dans les quadrants qui peuvent ainsi être mis chacun en communication avec l'un ou l'autre de ses voisins, à l'aide de chevilles métalliques. Les fils s'attachent à des vis fixées à chaque quadrant.

Le *commutateur Bourseul* permet d'inverser les quatre communications, deux à deux, par une seule manœuvre de cheville. Les quatre blocs de laiton (fig. 298), fendus suivant les diagonales d'un carré, laissent entre eux, au centre de l'appareil, un espace vide dans lequel on introduit une cheville d'une forme spéciale. Elle se compose de deux prismes triangulaires en

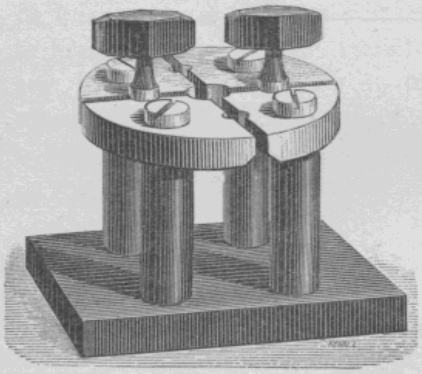


Fig. 297.

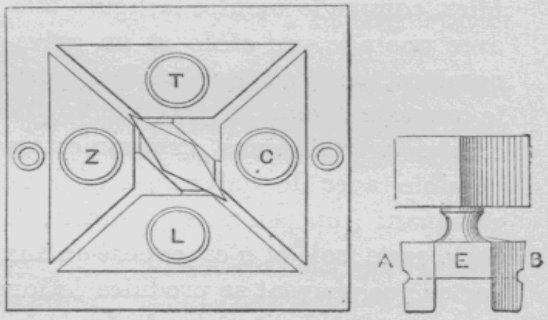


Fig. 298.

laiton, A, B, séparés par de l'ébonite E : les arêtes de ces prismes pénétrant entre les blocs établissent un très bon contact. La cheville pouvant être placée suivant l'une ou l'autre diagonale, on voit que le sens du courant envoyé par la pile dont les pôles sont en Z et C, dans le circuit dont les extrémités sont en L et en T, sera inverse dans les deux cas.

§ 6. — PILES

Pour faire les essais électriques, on se sert de piles Daniell et de ses dérivées (Callaud, Minotto) ou de piles Leclanché qui ont l'avantage d'avoir

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une plus grande force électromotrice que les précédentes, mais sont moins constantes. A bord des navires, on se sert fréquemment aujourd'hui de la pile au chlorure d'argent de M. Warren de la Rue, qui occupe peu de place et est très portative. Un élément de cette dernière pile se compose (fig. 299) d'un vase en verre A fermé par un bouchon de cire de paraffine et contenant une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque (23 grammes de sel pur dans un litre d'eau). Dans la dissolution plongent une baguette cylindrique C de zinc pur et un cylindre B de chlorure d'argent fondu, enfermé dans un manchon de parchemin végétal. Un fil d'argent *b*, qui forme l'électrode positive de l'élément, est soudé au cylindre B. L'intensité du courant développé est très constante : la force électromotrice d'un de ces éléments est en moyenne de 1,03 volt, sa résistance intérieure d'environ 5 ohms [1].

Une pile de 100 éléments Leclanché au moins est nécessaire pour les essais ordinaires des câbles. On fait arriver à une série de bornes placées sur des colonnes en ébonite le pôle négatif de la pile et les pôles positifs des éléments qui portent les numéros 1, 5, 10, 20, 30, 50, 100, de façon à pouvoir disposer facilement de l'intensité du courant dont on a besoin.

Le volt, unité B. A. de force électromotrice, ne pouvant être représenté d'une manière facile en pratique, on compare les forces électromotrices des piles dont on fait usage à celle d'un élément étalon que l'on entretient avec soin et dont on considère la force électromotrice comme constante. Les éléments le plus fréquemment employés à cet effet sont ceux de M. Latimer-Clark et du *Post-office* de Londres.

L'élément de M. Latimer-Clark se compose de mercure pur recouvert d'une pâte obtenue en faisant bouillir du sulfate de mercure dans une solu-

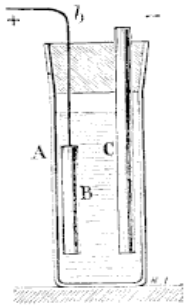


Fig. 299.

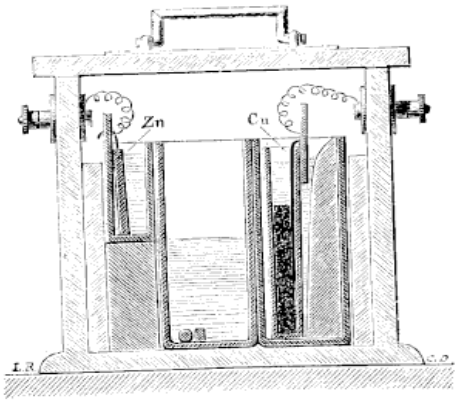


Fig. 300.

tion complètement saturée de sulfate de zinc. Le pôle positif est constitué

[1] Gordon (traduction de J. Raynaud). *Traité expérimental d'électricité et de magnétisme*, tome I[er], p. 448.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par une lame de zinc purifiée par distillation et reposant sur la pâte ; le mercure forme le pôle négatif. La force électromotrice de l'élément, à la température de 15°,5 C., est de 1,457 volt : elle diminue lorsque la température s'élève, le taux de la variation étant de 0,6 p. 100 au-dessus et au-dessous de 15°,5. Elle reste parfaitement constante lorsqu'on ne lui fait produire que des courants de très courte durée, suffisants pour comparer son intensité à celle des piles ordinaires.

L'élément étalon, créé par le *Post-office* de Londres, est un élément Daniell ordinaire dont le vase extérieur est divisé en trois compartiments. Quand l'élément (fig. 300) n'est pas en service, le compartiment de droite renferme le vase poreux avec la plaque de cuivre et les cristaux de sulfate de cuivre, le compartiment de gauche la plaque de zinc et de l'eau pure. Le compartiment central contient une dissolution à moitié saturée de sulfate de zinc et une baguette de zinc couchée dans un petit réduit au fond du compartiment. Lorsque l'on veut mettre l'élément en service, on retire la plaque de zinc et le vase poreux des chambres de repos et on les introduit dans le compartiment central : l'élément est alors prêt à fonctionner. Dès que l'on cesse d'en faire usage, on replace dans les chambres de repos la plaque de zinc et le vase poreux ; la petite quantité de sulfate de cuivre qui peut se trouver libre dans le liquide du compartiment central est décomposée par la baguette de zinc ; la dissolution n'est donc jamais altérée.

Lorsque cet élément est bien entretenu, sa force électromotrice est d'environ 1,079 volt. Mais au bout d'un certain temps, on doit soumettre toutes ses parties à un nettoyage complet et racler la plaque de cuivre et la baguette de zinc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XII

MESURES ÉLECTRIQUES DES PILES ET DES GALVANOMÈTRES

§ 1er. — Résistance intérieure des piles. — Méthode de la demi-déviation, — de Thomson, — de Mance, — d'opposition. — Mesure par l'électromètre.
§ 2. — Résistance des galvanomètres. — Méthode ordinaire, — de la demi-déviation, — des déviations égales, — de Thomson, — déduite de la mesure d'un shunt. — Figure de mérite des galvanomètres.
§ 3. — Force électromotrice des piles. — Mesure par l'électromètre. — Méthode des déviations égales, — des résistances égales, — de Wiedemann, — de Wheatstone, — de Poggendorff, — de Clark, — de Lacoine, — de Laws. — Mesure par la caisse de résistances à curseur.

§ 1er. — RÉSISTANCE INTÉRIEURE DES PILES

MÉTHODE DE LA DEMI-DÉVIATION

La pile, dont on veut mesurer la résistance r (fig. 301), est mise en circuit avec un galvanomètre G et un rhéostat dans lequel on débouche des résistances R, de manière à obtenir une large déviation δ de l'aiguille aimantée. On augmente R de manière à réduire la déviation à la moitié de sa valeur $\frac{\delta}{2}$: soit R_1 la résistance totale débouchée alors dans la caisse. Si E désigne la force électromotrice de la pile,

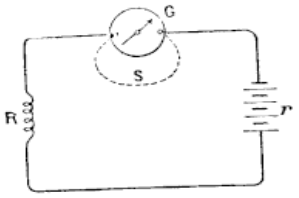


Fig. 301.

$$\delta = \frac{E}{r + G + R} \qquad \text{et} \qquad \frac{\delta}{2} = \frac{E}{r + G + R_1}$$

d'où

$$r = R_1 - (2R + G)$$

On se place dans les conditions les plus favorables pour l'essai, en prenant un galvanomètre de faible résistance et donnant à R une valeur assez petite pour que R + G ne soit qu'une fraction de r.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si l'on avait dû dériver le galvanomètre par un shunt S, il faudrait remplacer G par $\frac{G\,S}{G+S}$.

On prend quelquefois comme shunt un gros fil court, de telle sorte que $\frac{G\,S}{G+S}$ devienne négligeable ; alors

$$r = R_1 - 2R$$

et si l'on ne débouche aucune résistance dans la caisse pour obtenir δ,

$$r = R_1$$

MÉTHODE DE THOMSON

On forme un circuit (fig. 302) avec un galvanomètre G, une caisse de résistances R et la pile r ; en introduisant entre les deux pôles de celle-ci une dérivation de résistance ρ, on obtient une déviation δ de l'aiguille aimantée. On supprime la dérivation et on augmente R, de manière à conserver la même valeur à δ. R_1 désignant la nouvelle valeur de R et E la force électromotrice de la pile, on a

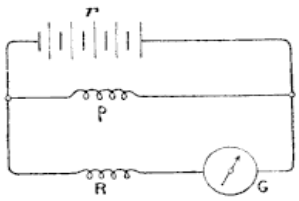


Fig. 302.

$$\delta = \frac{E}{r + \frac{\rho\,(G+R)}{\rho+G+R}} \times \frac{\rho}{\rho+G+R} = \frac{E}{r+G+R_1}$$

d'où

$$r = \rho\,\frac{R_1 - R}{G+R}$$

Si le galvanomètre avait été dérivé par un shunt S, dans les deux mesures on remplacerait G par $\frac{G\,S}{G+S}$.

MÉTHODE DE MANCE

On forme (fig. 303) un pont de Wheatstone dans lequel un simple interrupteur I occupe la place ordinairement affectée à la pile ; la pile dont on veut mesurer la résistance r est introduite dans la quatrième branche du pont. On fait varier les résistances a, b, c des trois autres branches jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre conserve une valeur fixe, que l'interrupteur soit ou non sur contact.

E désignant la force électromotrice de la pile, G la résistance du galvano-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mètre, l'intensité du courant qui traverse cet instrument, lorsque l'interrupteur est relevé, est proportionnelle à

$$\delta = \frac{E}{r + e + \frac{(a+b)G}{a+b+G}} \times \frac{a+b}{a+b+G}$$

et lorsqu'il est abaissé, la résistance A I D pouvant être négligée et les sommets A et D considérés alors comme se confondant, à

$$\delta = \frac{E}{r + \frac{\left(\frac{bc}{b+c} + G\right)a}{\frac{bc}{b+c} + G + a}} \times \frac{a}{a + G + \frac{bc}{b+c}}$$

Egalant les deux valeurs de δ et réduisant, on trouve

$$r = \frac{a\,c}{b}$$

Cette méthode a le grand avantage de n'exiger la constance de la pile que pendant le court intervalle de temps durant lequel on manœuvre l'interrupteur. Lorsque la pile dont on veut mesurer la résistance se compose d'un seul élément, le pont de Wheatstone à mètre divisé qui sera décrit plus bas (page 367) convient le mieux pour cet essai. Si l'élément a une très faible résistance, on intercale dans la branche C D une résistance auxiliaire suffisante pour maintenir le curseur vers le milieu du fil et on retranche cette résistance du résultat obtenu.

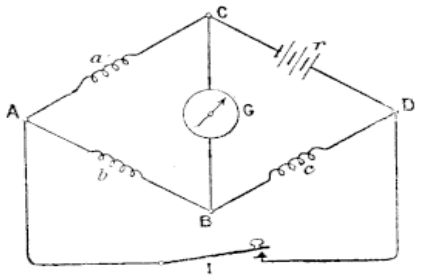


Fig. 303.

MÉTHODE D'OPPOSITION

Elle est applicable à une pile composée d'un grand nombre d'éléments. On divise la pile en deux fractions égales dont on réunit deux pôles de même

Fig. 304.

nom (fig 304) ; on mesure ensuite sa résistance comme celle d'un conducteur ordinaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PAR L'ÉLECTROMÈTRE

Si la pile ne comprend qu'un seul élément, on en relie un pôle à l'une des paires de quadrants de l'électromètre et en même temps à la plaque d'induction et à la cage de l'instrument, et l'autre pôle à l'autre paire de quadrants que l'on laisse bien isolée ; on note la déviation d obtenue. On réunit les deux pôles de l'élément par une résistance R et on note la nouvelle déviation d_1 de l'électromètre. r désignant la résistance intérieure de l'élément, on a (fig. 305) :

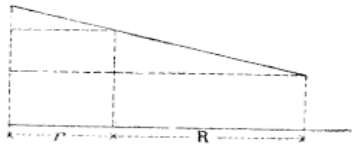


FIG. 305.

$$\frac{d}{d_1} = \frac{R + r}{R}$$

d'où

$$r = R\,\frac{d - d_1}{d_1}$$

§ 2. — RÉSISTANCE DES GALVANOMÈTRES

MÉTHODE ORDINAIRE

Si l'on dispose d'un second galvanomètre, la meilleure méthode à employer pour mesurer la résistance G d'un de ces instruments consiste (fig. 306) à enlever ou à fixer son aiguille aimantée et à introduire ses bobines comme une résistance ordinaire dans la quatrième branche du pont de Wheatstone. a, b, c étant les résistances débouchées quand l'équilibre est établi,

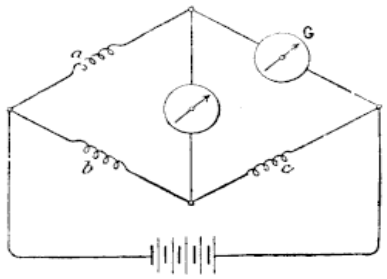


FIG. 306.

$$G = \frac{a\,c}{b}$$

La température du galvanomètre doit être notée au moment où la mesure est prise.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MÉTHODE DE LA DEMI-DÉVIATION

On introduit le galvanomètre dans un circuit avec une pile de très faible résistance et un rhéostat (fig. 301). On observe la déviation δ de l'aiguille correspondant à une résistance R ; on réduit la déviation à $\frac{\delta}{2}$ en augmentant R jusqu'à R_1. Si l'on peut négliger la résistance de la pile devant celle du galvanomètre

$$G = R_1 - 2R$$

Lorsque la résistance du galvanomètre est faible, il est nécessaire de déterminer d'abord la résistance ρ de la pile ; alors

$$G = R_1 - (2R + \rho)$$

On se place dans les conditions les plus favorables pour faire la mesure, en prenant pour ρ une valeur aussi faible que possible.

MÉTHODE DES DÉVIATION ÉGALES

On introduit dans un circuit le galvanomètre (fig. 307), dérivé par une résistance r, avec un rhéostat R et une pile de résistance ρ : soit δ la déviation de l'aiguille. On supprime r et on augmente R jusqu'à R_1, de façon à reproduire la déviation δ.

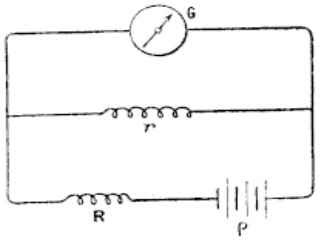


FIG. 307.

Si E représente la force électromotrice de la pile, on a

$$\delta = \frac{E}{R + \rho + \frac{G\,r}{G + r}} \times \frac{r}{G + r} = \frac{E}{G + R_1 + \rho}$$

d'où

$$G = r\,\frac{R_1 - R}{R + \rho}$$

Si la résistance de la pile est très faible et peut être négligée devant R, on a simplement

$$G = r\,\frac{R_1 - R}{R}$$

On peut dans cette méthode, comme dans la précédente, procéder par approximations successives, c'est-à-dire chercher une première valeur ap-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

prochée de la résistance du galvanomètre, en négligeant celle de la pile, déterminer ensuite celle-ci en se servant de la valeur trouvée pour G, et enfin faire une seconde mesure de la résistance du galvanomètre, en tenant compte de la résistance de la pile.

MÉTHODE DE THOMSON

Le galvanomètre est placé, avec son aiguille, dans la quatrième branche d'un pont de Wheatstone (fig. 308), et l'on remplace cet instrument, dans la diagonale qu'il occupe ordinairement, par un simple interrupteur. On fait varier la résistance du pont jusqu'à ce que l'on obtienne une déviation constante au galvanomètre, l'interrupteur étant sur contact ou relevé.

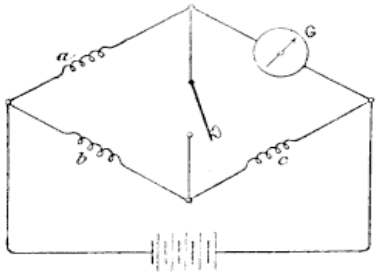


FIG. 308.

Cette méthode est absolument semblable à celle imaginée par sir H. Mance pour mesurer la résistance intérieure des piles. En refaisant les mêmes calculs, on voit que l'équilibre est obtenu lorsque

$$G = \frac{a\,c}{b}$$

Le résultat est entièrement indépendant de la résistance de la pile.

Pour faire l'essai dans les meilleures conditions, on doit prendre pour a une résistance aussi faible et pour b une résistance aussi élevée que possible, étant entendu que c n'excédera pas ainsi la somme des résistances dont on peut disposer.

MÉTHODE DÉDUITE DE LA MESURE D'UN SHUNT

On peut encore obtenir la résistance d'un galvanomètre, en mesurant dans un pont de Wheatstone celle S de l'une des bobines de la boîte de shunts. Si l'on a

$$S = \frac{1}{n}\,G$$

on en conclut

$$G = n\,S$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il est préférable de prendre pour cette mesure la bobine dont la résistance est la plus grande (le 1/9 de G ordinairement).

FIGURE DE MÉRITE DES GALVANOMÈTRES

Les communications étant établies comme l'indique la figure 301, si la pile ne comprend qu'un seul élément Daniell de résistance r, et que l'on représente par

R la résistance débouchée dans la caisse,

G et S celles du galvanomètre et de son shunt.

d la déviation de l'aiguille aimantée,

la figure de mérite F sera

$$F = d\,\frac{G+S}{S}\left(\frac{GS}{G+S} + R + r\right)$$

d étant exprimé en degrés d'arc pour les galvanomètres ordinaires et en divisions de l'échelle pour les galvanomètres à miroir.

Si l'on voulait comparer ensemble deux galvanomètres d'espèces différentes, il faudrait prendre pour celui à miroir

$$F = \frac{1}{2}\,\text{arc tang}\,\frac{d}{l}\,\frac{G+S}{S}\left(\frac{GS}{G+S} + R + r\right)$$

l désignant la distance du miroir à l'échelle pour laquelle a été obtenue la déviation d, en unités de même espèce que celles exprimant les divisions de l'échelle.

§ 3. — FORCE ÉLECTROMOTRICE DES PILES

MESURE PAR L'ÉLECTROMÈTRE A QUADRANTS

On relie l'un des pôles de la pile à l'une des paires de quadrants (fig. 309) et en même temps à la plaque d'induction et à la cage de l'instrument; l'autre pôle est relié à la seconde paire de quadrants que l'on laisse bien isolée. Soit d la déviation observée, E la force électromotrice de la pile en essai.

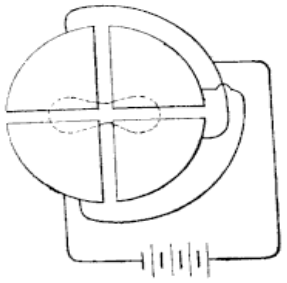


FIG. 309.

L'électromètre étant ramené à l'état neutre, on remplace la pile E par celle à laquelle on veut la comparer : soit d_1 la nou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

velle déviation observée et E_1 la force électromotrice de la seconde pile. On aura

$$E = E_1 \frac{d}{d_1}$$

Si la seconde pile représente un élément étalon dont la force électromotrice en volts est connue approximativement, E sera exprimé lui-même en volts.

MÉTHODE DES DÉVIATIONS ÉGALES

On réunit (fig. 301) en circuit un galvanomètre G, une caisse de résistances R et la pile dont on veut déterminer la force électromotrice E ; soit r sa résistance intérieure, d la déviation de l'aiguille aimantée. On remplace E par la pile E_1 dont la résistance intérieure est r_1 et on fait varier R de manière à reproduire la déviation précédente d ; soit R_1 la somme des résistances débouchées dans la caisse

$$E = E_1 \frac{R + G + r}{R_1 + G + r_1}$$

Si $G + r_1$ et $G + r$ sont négligeables devant R_1 et R, on peut écrire simplement

$$E = E_1 \frac{R}{R_1}$$

Si l'on était obligé d'employer dans les deux mesures des shunts de résistances S et S_1 pour obtenir des déviations d égales sur l'échelle,

$$E = E_1 \frac{R \dfrac{G + S}{S}}{R_1 \dfrac{G + S_1}{S_1}}$$

qui se réduirait à

$$E = E_1 \frac{R \dfrac{G + S}{S}}{R_1}$$

si la première mesure seule nécessitait un shunt.

MÉTHODE DES RÉSISTANCES ÉGALES

Les communications étant disposées comme dans l'essai précédent, on note la déviation d de l'aiguille avec la pile E, pour une résistance totale en circuit R comprenant celles de la pile et du galvanomètre. On remplace E

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par E_1 et on fait varier les résistances débouchées dans la caisse, de telle sorte que la résistance totale soit encore R. Si d_1 est la nouvelle déviation observée à l'échelle

$$E = E_1 \frac{d}{d_1}$$

MÉTHODE DE WIEDEMANN

Les piles E par E_1 sont réunies en circuit avec un galvanomètre et une caisse de résistances, de manière à donner des courants dirigés d'abord dans le même sens, ensuite en sens contraire. Si d et d_1 sont les déviations correspondantes

$$E = E_1 \frac{d + d_1}{d - d_1}$$

MÉTHODE DE WHEATSTONE

La pile E, mise en circuit avec un galvanomètre et une caisse de résistances, donne une déviation d; soit d_1 la déviation plus faible que l'on obtient en augmentant de r la résistance totale R du circuit.

On remplace E par E_1 et on modifie la résistance du circuit de manière à reproduire d'abord la déviation précédente d; soit R_1 la nouvelle résistance totale du circuit et r_1 la résistance qu'il faut y ajouter pour passer de d à d_1. On aura

$$\frac{E}{R} = \frac{E_1}{R_1} \quad \text{et} \quad \frac{E}{R + r} = \frac{E_1}{R_1 + r_1}$$

d'où

$$E = E_1 \frac{r}{r_1}$$

MÉTHODE DE POGGENDORFF

Les deux piles sont opposées par leurs pôles de même nom (fig. 310) dans un circuit avec un galvanomètre; une caisse de résistances est placée en dérivation entre les deux piles de façon à ce que celle dont la force électromotrice E_1 est la plus petite soit dans la même branche que le galvanomètre. On règle la résistance R de telle sorte que la déviation du galvanomètre soit nulle.

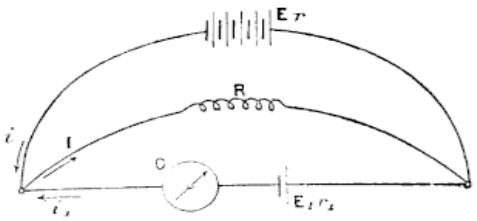


FIG. 310

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En désignant par I, i, i_1 les intensités des courants qui circulent dans les trois branches du circuit, les lois de Kirchhoff donnent les trois relations

$$\begin{gathered} I = i + i_1 \\ i\,r - E + I\,R = 0 \\ i_1\,(r_1 + G) - E_1 + I\,R = 0 \end{gathered}$$

D'où l'on tire, par la condition $i_1 = 0$

$$E = E_1 \frac{r + R}{R}$$

Si l'on ne connaît pas la résistance r de la pile E, on introduit (fig. 311)

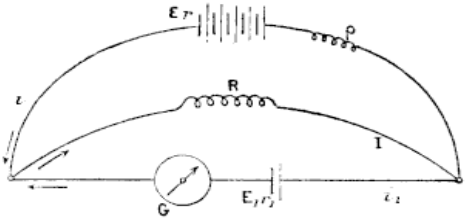


FIG. 311.

une deuxième caisse de résistances dans la branche correspondante et on cherche les valeurs de R et de R_1 qui donnent l'équilibre pour deux résistances ρ et ρ_1 choisies arbitrairement. Des calculs analogues aux précédents donnent

$$E = E_1 \frac{R - R_1 + \rho - \rho_1}{R - R_1}$$

MÉTHODE DE CLARK

Pour éviter les effets de la polarisation dont la pile E_1, dans la méthode précédente, est seule exempte, M. Clark remplace dans l'arrangement imaginé par Poggendorff, la pile E par une pile auxiliaire E_2 (fig. 312) et la caisse de résistances R par un fil de platine bien calibré enroulé sur un cylindre en ébonite et dont les différents points peuvent être mis en contact avec un curseur mobile le long d'une règle divisée en 1000 parties égales. M. Clark a donné le nom de *potentiomètre* à cet appareil.

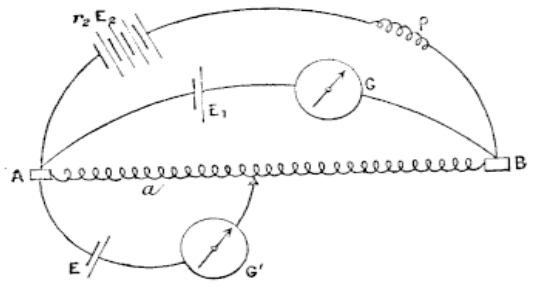


FIG. 312.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On fait varier la résistance ρ de façon à obtenir l'équilibre au galvanomètre G et l'on a

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{r_2 + \rho + R}{R}$$

r_2 désignant la résistance de la pile auxiliaire et R celle du fil entier AB.

La pile E que l'on veut comparer à E_1 est reliée d'une part à A et d'autre part, par l'intermédiaire d'un second galvanomètre G′, au curseur que l'on déplace de manière à n'avoir aucune déviation à G′. a désignant la résistance du fil du potentiomètre entre la borne A et le curseur,

$$\frac{E_2}{E} = \frac{r_2 + \rho + R}{a}$$

d'où

$$E = E_1 \frac{a}{R}$$

et si n représente le nombre de divisions marquées par le curseur sur la règle

$$E = E_1 \frac{n}{1\,000}$$

Le galvanomètre G permet de faire la mesure avec plus de précision, mais n'est pas indispensable, l'équilibre étant rompu en G aussi bien qu'en G′ dès que le curseur n'occupe pas la position convenable sur la règle, après l'introduction de E.

MÉTHODE DE LACOINE

Les deux piles sont placées avec deux caisses de résistances dans un circuit, de telle sorte que leurs courants s'y ajoutent : le galvanomètre est intercalé dans la dérivation AB (fig. 313). On fait varier les résistances débouchées dans les deux caisses jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre soit au zéro.

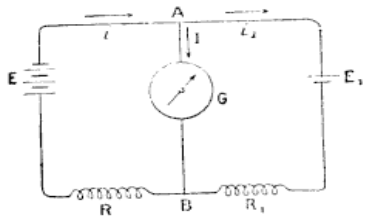


FIG. 313.

Des trois relations

$$i_1 + I = i$$
$$i\,R + I\,G - E = 0$$
$$iR + i_1\,R_1 - E - E_1 \neq 0$$

et de la condition d'équilibre $I = 0$, on tire

$$E = E_1 \frac{R}{R_1}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

R et R_1 représentant les sommes des résistances débouchées dans chaque caisse et de la pile voisine.

MÉTHODE DE LAWS

On charge un condensateur successivement avec les piles que l'on veut comparer et l'on reçoit les décharges dans un galvanomètre. La charge Q d'un condensateur étant proportionnelle à la différence de potentiel E de ses deux armatures et une quantité Q d'électricité, déchargée à travers un galvanomètre, au sinus de la moitié de l'angle décrit par l'aiguille aimantée dans sa première impulsion [1], on a sensiblement

$$\frac{E}{E_1} = \frac{Q}{Q_1} = \frac{\sin \frac{\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi_1}{2}} = \frac{d}{d_1}$$

d et d_1 étant les déviations observées au galvanomètre.

Si l'on emploie des shunts de résistances S et S_1,

$$\frac{E}{E_1} = \frac{d}{d_1} \frac{\frac{G + S}{S}}{\frac{G + S_1}{S_1}}$$

Cette méthode est celle qui est le plus fréquemment employée pour la comparaison des forces électromotrices des piles, dans les essais de télégraphie sous-marine. Les communications sont généralement établies comme l'indique la figure 314 dans laquelle :

G désigne le galvanomètre,
S son shunt,
C le condensateur,
P une pile de 100 éléments divisée en 4 fractions,
P_1 l'élément étalon,
T la plaque de terre,
B le commutateur de piles,
I l'inverseur de piles,
W une clef de Webb,
M une double clef à inversion,
D une clef de court circuit.

[1] Maxwell. *Electricity and Magnetism*, vol. II, p. 347.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On charge le condensateur C pendant quinze secondes, en abaissant la poignée de la clef de Webb ; on met celle-ci au cran de repos et on abaisse successivement l'une des touches de M et la clef D ; immédiatement après,

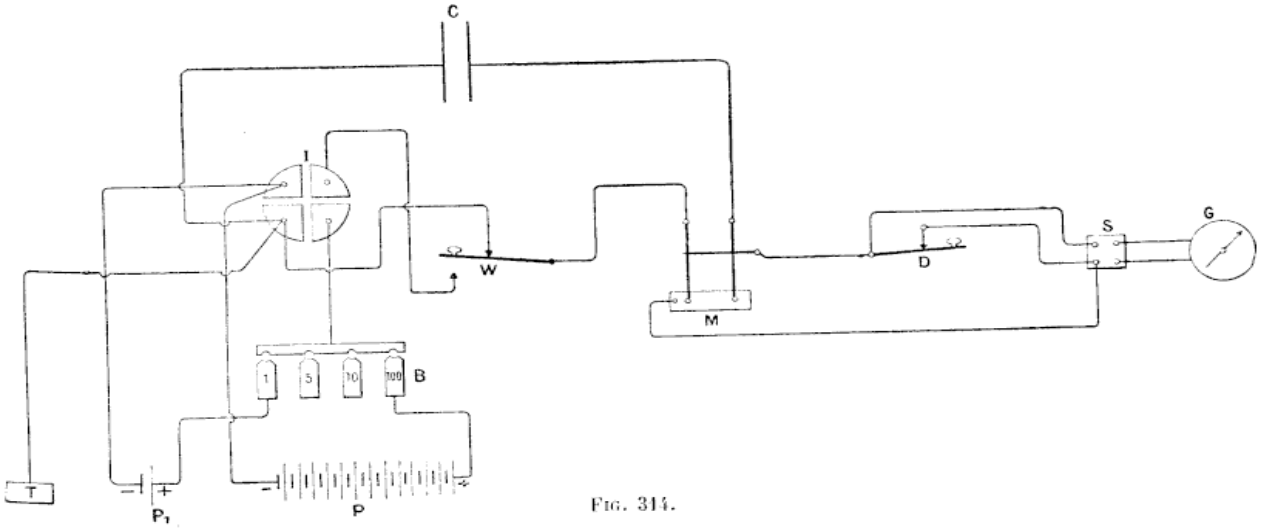


Fig. 314.

on laisse se relever la poignée de W et on lit l'impulsion de l'aiguille du galvanomètre due à la décharge du condensateur.

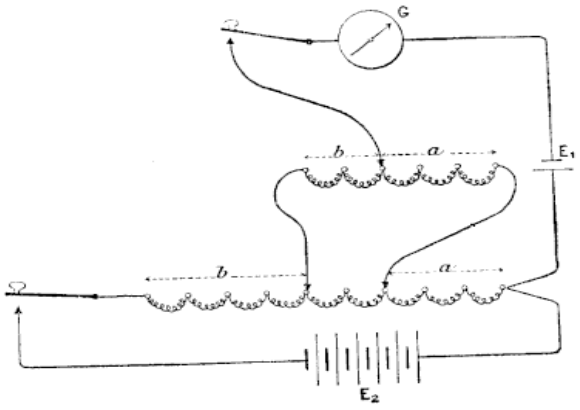


Fig. 315.

Il convient d'expérimenter d'abord la pile la plus faible, afin d'éviter les effets de charge résiduelle dans le condensateur.

MESURE PAR LA CAISSE DE RÉSISTANCES A CURSEUR

E_1 et E_2 étant les forces électromotrices de la pile étalon et de celle à mesurer (fig. 315), opposées par leurs pôles de même nom, a et b le dixième

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des résistances correspondant à l'équilibre des deux parties de la caisse, vernier compris, on a, en négligeant la résistance de la pile E_2

$$\frac{E_2 - E_1}{E_1} = \frac{b}{a}$$

d'où, comme $a + b = 10\,000$,

$$E_2 = \frac{10\,000}{a} E_1$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XIII

MESURES ÉLECTRIQUES DES CABLES SOUS-MARINS

§ 1er. Résistance du conducteur. — Mesure par le galvanomètre, — par l'électromètre, — par substitution, — par le pont de Wheatstone, — par la caisse de résistances à curseur de Thomson et Varley.

Cas particuliers divers. — Faux zéro.

Mesure de très petites résistances, — d'un grand nombre de résistances à peu près égales.

§ 2. Isolement. — Méthode du pont de Wheatstone, — de Siemens; perte de charge. — Méthode de substitution : constante, perte des appareils et des fils de secours, courant naturel du câble, électrification, décharge. Exemple numérique — Méthode de Jenkin par l'électromètre : principe, mode d'opération; exemple numérique.

Résistance spécifique du diélectrique.

§ 3. Capacité électrostatique. — Mesure par comparaison directe. — Méthode de Siemens, — de Gott, — de Thomson.

Capacité électrostatique spécifique.

§ 4. Essais des soudures. — Méthode d'accumulation avec le galvanomètre, — l'électromètre.

§ 5. Essais pendant l'immersion des cables. — 1er procédé. — 2e procédé.

§ 6. Types de carnets en usage pour l'inscription des résultats des divers essais.

§ 1er. — RÉSISTANCE DU CONDUCTEUR

MESURE PAR LE GALVANOMÈTRE DIFFÉRENTIEL

On réunit à l'un des pôles d'une pile deux des bornes du galvanomètre différentiel (fig. 316), de telle sorte que le courant traverse les deux bobines en sens contraire : les deux autres bornes sont reliées, l'une à la résistance à mesurer x, l'autre à une caisse de résistances R. On ferme le circuit à l'autre pôle de la pile, ou, en cas de besoin, par la terre. Lorsque l'équilibre est établi, la résistance à mesurer est exactement égale à la somme des résistances débouchées dans la caisse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le maximum de sensibilité du galvanomètre correspond au cas où, la résis-

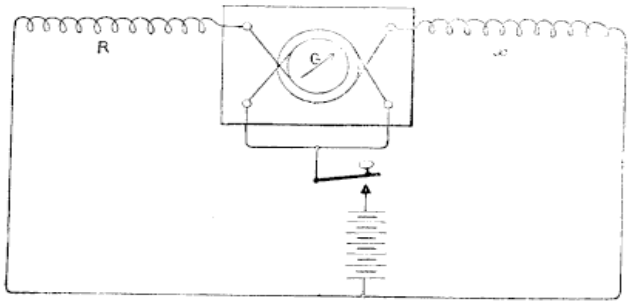


Fig. 316.

tance de la pile étant négligeable, celle de chacune des deux bobines de l'instrument est égale au tiers de la résistance à mesurer.

MESURE PAR L'ÉLECTROMÈTRE

On forme un circuit avec la résistance à mesurer x, une résistance connue R et une pile, et on mesure, à l'électromètre, les différences de potentiel aux deux extrémités des deux résistances x et R : soient d et d_1 les déviations observées. On aura

$$\frac{d}{d_1} = \frac{x}{\mathrm{R}}$$

d'où

$$x = \mathrm{R}\,\frac{d}{d_1}$$

MESURE PAR SUBSTITUTION

On lit la déviation d obtenue au galvanomètre dans un circuit comprenant une pile et la résistance à mesurer x. On remplace celle-ci par une caisse dont on fait varier les résistances de manière à reproduire la déviation d ; x sera égal à la somme des résistances débouchées.

Si l'on fait usage d'un shunt, il faut le conserver avec la même valeur dans les deux expériences.

Le maximum de sensibilité du galvanomètre correspond au cas où sa résistance est égale à la résistance extérieure du circuit.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MESURE PAR LE PONT DE WHEATSTONE

a et b étant les résistances des branches de comparaison, c celle qui produit l'équilibre (fig. 317).

$$x = \frac{a\,c}{b}$$

En faisant varier convenablement le rapport $\frac{a}{b}$, on peut ou mesurer avec une plus grande précision une résistance relativement faible, ou mesurer une résistance supérieure à celle formée par la somme des résistances des bobines de la troisième branche de la caisse.

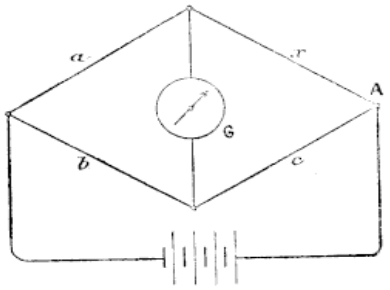


FIG. 317.

Pour se mettre dans les conditions les plus favorables, on doit placer la plus grande des deux résistances, galvanomètre et pile, dans la branche qui réunit les deux plus grandes résistances du pont aux deux résistances les plus faibles. Généralement, le galvanomètre a une résistance bien supérieure à celle de la pile.

Les communications ont la disposition indiquée par la figure 318 dans laquelle

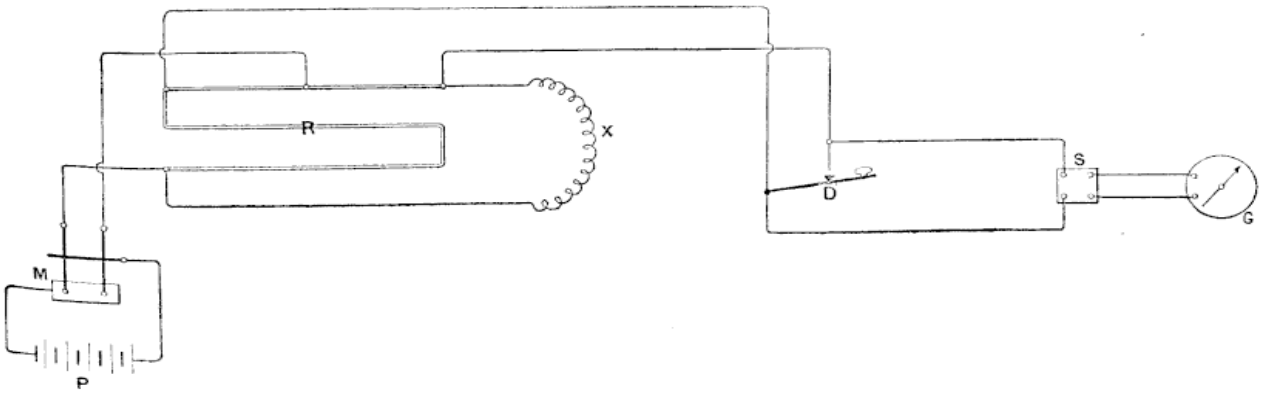


FIG. 318.

R représente une caisse de résistances avec branches de comparaison,

X la résistance à mesurer;

Les autres instruments sont représentés par les mêmes lettres que dans la figure 314.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CAS PARTICULIERS DIVERS. — FAUX ZÉRO

Lorsque la résistance à mesurer est un câble éloigné de la salle d'expériences, on y amène les deux extrémités à l'aide de fils de secours : on en retranche la résistance de la résistance totale observée. Avant d'abaisser la clef D, on doit chaque fois donner au câble le temps de prendre sa charge complète, les effets du courant de charge pouvant masquer ceux dus au défaut d'équilibre des quatre résistances. Le temps durant lequel se charge un câble varie de dix à quarante secondes pour des longueurs de 500 à 2 000 milles.

Lorsqu'on ne peut obtenir l'équilibre rigoureusement exact et que, pour une certaine résistance c, l'aiguille dévie de n divisions à droite, par exemple, et que pour la résistance $c - 1$, elle dévie de n' divisions à gauche, la valeur exacte de la résistance correspondant au zéro de l'aiguille est

$$c - 1 + \frac{n'}{n + n'} = c - \frac{n}{n + n'}$$

$\frac{n}{n + n'}$ étant exprimé en unités de l'ordre le plus faible contenu dans la caisse (ohm ou $\frac{1}{1}$ d'ohm).

Les essais sont faits alternativement avec le courant positif et le courant négatif. Les résultats des deux séries en doivent être identiques. S'ils sont très voisins, on en prend la moyenne arithmétique.

La sensibilité du galvanomètre est maxima, toutes autres choses égales, lorsque sa résistance G est égale à celle des branches $a + b$, $x + c$ (fig. 317) prises en circuits parallèles.

Lorsqu'un câble est immergé entre deux points éloignés l'un de l'autre, on opère à l'une de ses extrémités comme il vient d'être dit, en mettant les deux fils qui aboutissent au point A, à la station où l'on opère, en communication avec une bonne terre; on met de même à la terre l'extrémité éloignée du conducteur en cuivre. Les essais faits alternativement avec les courants positif et négatif sont rarement concordants, les courants terrestres qui arrivent dans le câble par les plaques de terre, et ceux dus à la polarisation de ces plaques introduisant dans le pont des forces électromotrices étrangères. On peut en éliminer l'effet en employant le *faux zéro*.

A cet effet, on abaisse la clef D (fig. 319), les deux touches de M restant relevées, et on lit la déviation due à la partie des courants étrangers qui traversent la branche du galvanomètre : supposons qu'elle soit de d divi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sions à gauche. Immédiatement après on effectue rapidement une série de mesures par les deux courants positif et négatif, en balançant les résistances de telle sorte que l'aiguille soit en équilibre à la division d de l'échelle

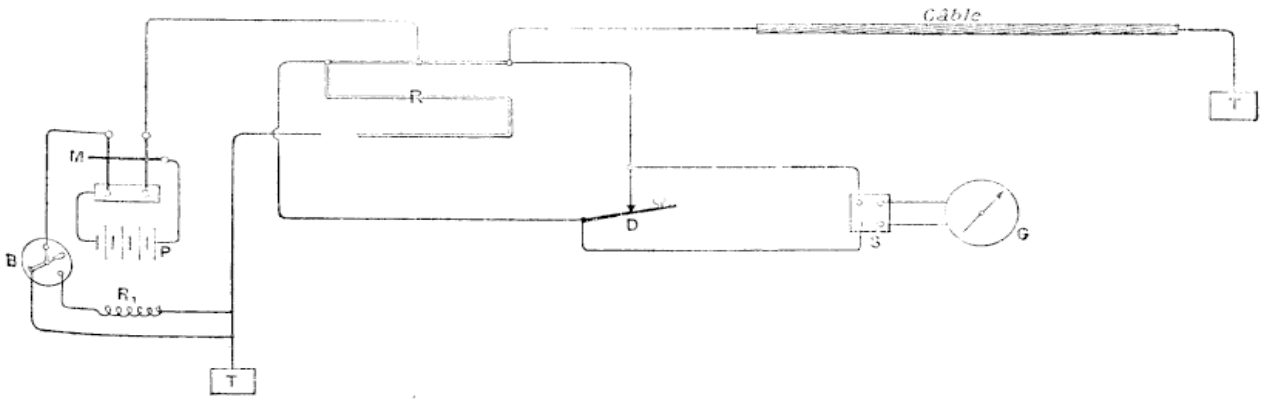


Fig. 319.

du côté gauche du zéro, cette position étant considérée provisoirement comme un nouveau zéro.

Précédemment, on insérait entre la double clef M et la terre une résistance R_1 égale à celle de la pile P et, à l'aide d'un commutateur rond B, on reliait le sommet du pont à la terre, soit à travers cette résistance lorsque l'on voulait observer la déviation d correspondant au faux zéro, soit

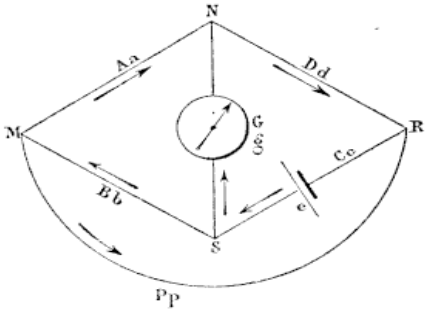


Fig. 320.

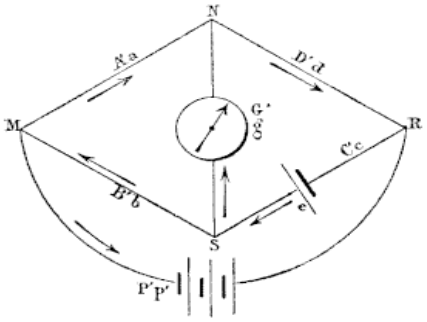


Fig. 321.

directement sans aucune résistance auxiliaire, lorsque l'on voulait prendre une mesure, la résistance de la pile P remplaçant, dans le second cas, la résistance R_1 dans le circuit dont l'équilibre n'était ainsi pas troublé. M. Lacoine a montré [1] que cette précaution est inutile, la valeur obtenue, dans ces conditions, pour la résistance du câble étant indépendante de la résistance de la diagonale du pont qui contient la pile.

Si nous représentons en effet (fig. 320 et 321) la résistance des diverses

[1] *Journal télégraphique de Berne*, XII[e] vol., n° 1.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

branches du pont par les lettres minuscules a, b, c, d, g, p et les intensités des courants par les lettres majuscules correspondantes, majuscules sans accent pour les courants de la première partie de l'essai et accentuées pour ceux de la seconde partie, nous aurons, d'après les lois de Kirchhoff

$$\begin{gathered} A\,a - G\,g + B\,b = o \\ A'\,a - G'\,g + B'\,b = o \\ B = A + P \\ B' = A' + P' \end{gathered}$$

On en tire, avec la condition $G' = G$

$$(A - A')\,(a + b) = b\,(P' - P)$$

De même

$$(D - D')\,(c + d) = c\,(P' - P)$$

Divisant ces deux dernières équations membre à membre et remarquant que

$$A + G = D \qquad A' + G' = D'$$

d'où résulte $A - A' = D - D'$, il vient

$$\frac{a + b}{c + d} = \frac{b}{c}$$

ou

$$c = b\,\frac{d}{a}$$

La valeur de c étant indépendante de p, on peut prendre celle-ci égale à zéro : on évite ainsi l'emploi d'instruments supplémentaires, la mesure de la résistance de la pile et une double manœuvre du commutateur rond à chaque lecture du faux zéro. La méthode se trouve donc notablement simplifiée.

On prend les moyennes arithmétiques c' et c'' des résistances c obtenues avec chaque courant; la résistance cherchée x s'en déduit par une relation assez compliquée [1]. On peut, avec M. Dresing, y substituer dans la pratique, avec une approximation suffisante, l'expression

$$x = \frac{a}{b}\sqrt{c'\,c''}$$

qui résulte de considérations géométriques très simples. Si le potentiel de la pile est en effet $\pm V$, celui à l'extrémité B du câble AB (fig. 322) et provenant des plaques de terre v, la construction de la ligne AC moyenne proportionnelle entre AB′ et AB″, donnera

$$\overline{AC}^2 = \overline{AB'} \times \overline{AB''}$$

[1] Kempe. *Traité de mesures électriques*, traduction de M. Berger, 1885, p. 211.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'où approximativement

$$AB = \sqrt{\overline{AB'} \times \overline{AB''}}$$

Le résultat ainsi obtenu est plus exact que celui que donne la formule

$$x = \frac{a}{b} \frac{2\,e'\,e''}{e' + e''}$$

et surtout que la suivante

$$x = \frac{a}{b} \frac{e' + e''}{2}$$

qui ne doit jamais être appliquée dans ces conditions.

La résistance de l'unité de longueur, du mille marin de câble par exemple, s'obtiendra en divisant x par la longueur du câble exprimée en milles.

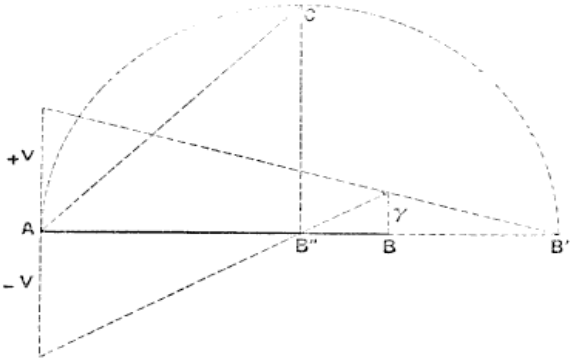


Fig. 322.

Lorsqu'on dispose de trois lignes aboutissant aux mêmes points extrêmes, on peut mesurer facilement la résistance du cuivre de chacune d'elles, sans être troublé par les courants étrangers. A cet effet, on les fait boucler deux à deux successivement à l'extrémité éloignée et l'on mesure chaque fois la résistance du circuit, sans y introduire la terre. En désignant par x, y et z les résistances des trois lignes, par R, R_1, R_2 celles mesurées des trois circuits, on a trois équations

$$\begin{aligned} x + y &= R \\ x + z &= R_1 \\ y + z &= R_2 \end{aligned}$$

d'où l'on tire facilement x, y, et z.

On peut, par des procédés analogues, déterminer la résistance de la terre entre deux points. Deux fils doivent relier les deux points considérés : on les réunit d'abord à l'extrémité éloignée et on mesure la résistance du circuit; on met ensuite chacun d'eux successivement à la terre et on prend deux nouvelles mesures. On obtient, comme précédemment, trois équations du premier degré dans lesquelles la résistance de la terre est l'une des trois inconnues.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MESURE PAR LA CAISSE DE RÉSISTANCES DE THOMSON ET VARLEY

A bord des navires, on mesure fréquemment la résistance du cuivre et même l'isolement des câbles immergés ou en cours d'immersion, en faisant usage de la caisse de résistances à curseur de Thomson et Varley. Le pont de Wheatstone a la disposition théorique indiquée par la figure 323 dans laquelle

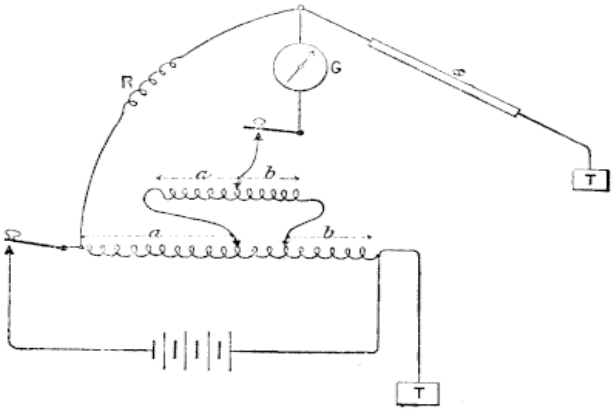


Fig. 323.

R représente une résistance fixe,

x celle du câble,

a et b celles variables de la caisse et de son vernier divisées par 10. Ces résistances n'entrant dans les calculs que par leur rapport et étant toujours des multiples de 10, par suite du mode de construction même de la caisse, sont divisées par 10 pour plus de simplicité.

Lorsque l'équilibre est établi, on a

$$\frac{a}{b} = \frac{R}{x}$$

d'où

$$x = R\,\frac{10000 - a}{a} = R\left(10000\,\frac{1}{a} - 1\right)$$

Les calculs sont très rapides lorsque l'on dispose d'une table des inverses des nombres.

On se place dans les meilleures conditions pour l'essai en donnant à R une valeur à peu près égale à celle à mesurer.

Exemple : — Soit R = 1 000 et comme l'indique la fig. 285, $a = 9\,500 + 68$. On aura

$$x = 1\,000\left(\frac{10\,000}{9\,568} - 1\right) = 45{,}19 \text{ ohms}$$

Avec une table des inverses des nombres, on trouve immédiatement $\frac{1}{9568} = 0{,}000104519$ et par suite

$$x = 1\,000\left(1{,}04519 - 1\right) = 45^{\omega},19$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MESURE DE TRÈS PETITES RÉSISTANCES

Lorsqu'on a à mesurer de très petites résistances, on emploie la forme du pont de Wheatstone représentée par la figure 324. AB, BC, CD, DF et AE sont de larges bandes de cuivre dont les trois premières portent chacune trois bornes, l'une au milieu, les deux autres aux extrémités : aux points E et F est soudé un fil en maillechort ou en alliage de platine et d'iridium

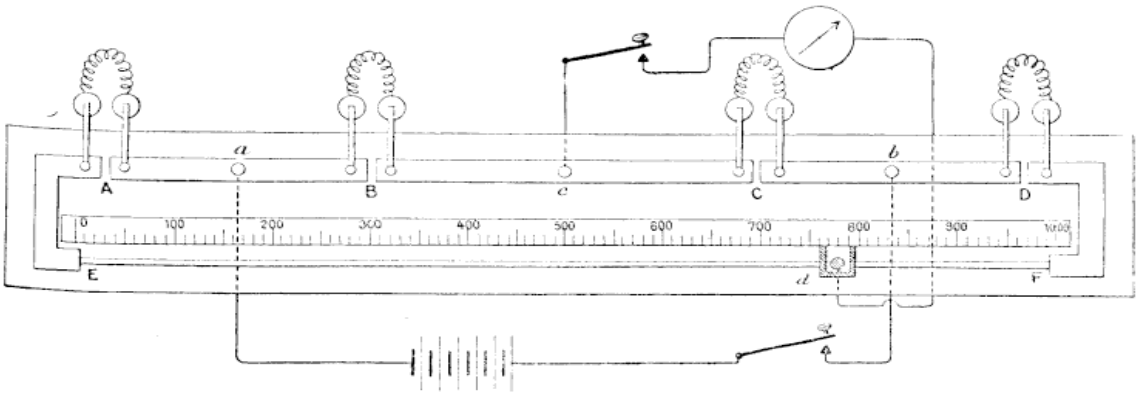


FIG. 324.

de 1,5 à 2 millimètres de diamètre et d'un mètre de longueur, tendu en face d'une règle divisée en millimètres ; ce fil peut être parcouru par un curseur muni d'une borne. Les communications s'établissent à l'aide de larges lames de cuivre plongeant dans des godets remplis de mercure.

On insère en A la résistance à mesurer qui doit être plus petite que celle du fil EF, en B et C deux résistances sensiblement égales et telles que leur rapport ne diffère pas de l'unité d'une quantité supérieure à celle dont en diffère le rapport de la résistance du fil à mesurer au fil EF.

On réunit directement les deux lames CD et DF en D. Les pôles de la pile aboutissent en *a* et *b*, ceux du galvanomètre en *c* et *d*. On fait varier la position du curseur jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. On transporte ensuite la résistance à mesurer en D et l'on bouche A par un bout de très gros fil : on déplace encore le curseur de manière à obtenir un nouvel équilibre. La résistance cherchée est égale à celle de la partie du fil EF comprise entre les deux positions du curseur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MESURE D'UN GRAND NOMBRE DE RÉSISTANCES SENSIBLEMENT ÉGALES

Lorsqu'on fabrique un câble, on a à mesurer les résistances, ne dépassant pas en général quelques ohms, d'un grand nombre de bobines de longueurs sensiblement égales. On compare alors ces résistances à celle d'une bobine étalon que l'on détermine préalablement avec soin. Les communications sont disposées comme précédemment, sauf que la bobine étalon remplace successivement en D et en A, la bobine d'âme en essai. Les deux bobines sont plongées dans de l'eau à 24° C. pendant vingt-quatre heures au moins avant les expériences.

Si l'on désigne par

x la résistance de la bobine à mesurer,
R celle de la bobine étalon,
r celle comprise entre les points a et c,
r' celle comprise entre les points c et b,
α celle des fils de communication entre les points a et E,
celle des fils de communication entre les points b et F,
l celle du fil EF,
n le nombre de divisions comprises entre le point E et la première position du curseur d,
n' le nombre de divisions comprises entre le point E et la seconde position du curseur d,
ρ la résistance d'un mètre du fil E F,
on a, pour les deux mesures,

$$\frac{r}{r'} = \frac{x + \alpha + n\,\rho}{\mathrm{R} + \beta + l - n\,\rho} \quad \text{et} \quad \frac{r}{r'} = \frac{\mathrm{R} + \alpha + n'\,\rho}{x + \beta + l - n'\,\rho}$$

D'où

$$\frac{x + \mathrm{R} + \alpha + \beta + l}{\mathrm{R} + \beta + l - n\,\rho} = \frac{x + \mathrm{R} + \alpha + \beta + l}{x + \beta + l - n'\,\rho}$$

Par suite

$$x = \mathrm{R} + (n' - n)\,\rho$$

et on voit que si on fait $\mathrm{R} = 0$, comme dans l'expérience précédente, on a simplement

$$x = (n' - n)\,\rho$$

On se sert quelquefois, pour ces essais, d'un interrupteur à deux contacts (fig. 325) séparés par de l'ébonite et disposés de telle sorte que le circuit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la pile soit fermé d'abord, celui du galvanomètre ensuite : on n'a ainsi qu'une seule manœuvre à faire.

Si ρ n'était pas connu, on le déterminerait facilement de la manière suivante : On prendrait un fil d'une résistance z un peu inférieure à celle du fil E F et on la mesurerait sans résistance auxiliaire R. m représentant la différence des deux lectures faites sur l'échelle

Fig. 325.

$$z = m\,\rho$$

On établirait z en dérivation avec une résistance R_1 exactement connue, une bobine étalon d'un ohm, par exemple, et on mesurerait de la même manière la résistance du circuit composé. En désignant par m_1 la différence des deux nouvelles lectures faites sur l'échelle, on aurait

$$m_1\,\rho = \frac{z\,R_1}{z + R_1}$$

Par suite

$$\rho = R_1\,\frac{m - m_1}{m\,m_1}$$

§ 2. — ISOLEMENT

Lorsqu'un fil conducteur est entouré d'une enveloppe continue isolante et homogène, la déperdition de l'électricité se fait, en chaque point de l'enveloppe, dans une direction normale au conducteur (fig. 326) : le diélectrique peut donc être considéré comme constituant au fil de cuivre une infinité de dérivations auxquelles on peut appliquer les lois ordinaires des circuits dérivés.

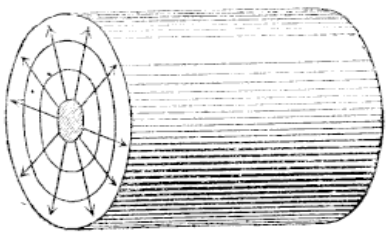


Fig. 326.

Dans la pratique, on peut généralement négliger la résistance du cuivre comparativement à celle des matières employées comme isolants dans les câbles sous-marins et considérer, par suite, les différentes tranches du diélectrique, prises normalement au conducteur, comme constituant autant de résistances réunies en arc multiple.

Si donc r désigne la résistance de l'une de ces tranches dans le sens perpendiculaire à l'axe, R la résistance d'isolement totale du câble

$$\frac{1}{R} = \Sigma\,\frac{1}{r}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si les tranches sont homogènes, si leur longueur dans le sens de l'axe est égale à l'unité de longueur et celle du câble à **L** fois cette même unité

$$\frac{1}{R} = L\,\frac{1}{r}$$

d'où

$$r = R\,L$$

On déduit en conséquence l'isolement moyen d'un câble, par mille marin, de son isolement total, en *multipliant* ce dernier par la longueur du câble exprimée en milles marins.

Il suit de là aussi que si un câble est composé de sections AC, CD, DB

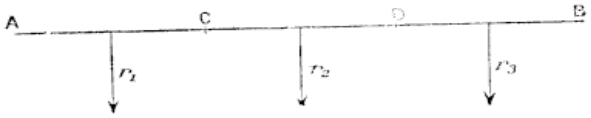


Fig. 327

(fig. 327) dont les isolements totaux sont respectivement r_1, r_2, r_3, la résistance totale R du câble se calculera par la relation

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$$

ou en général par

$$\frac{1}{R} = \Sigma\,\frac{1}{r}$$

MESURE PAR LE PONT DE WHEATSTONE

On peut, avec les caisses de résistances ordinaires, mesurer des résistances inférieures à un megohm et, avec celles à cadrans qui permettent de faire $\frac{a}{b} = 1000$, des résistances allant jusqu'à 10 megohms. Si l'isolement total d'un câble est inférieur à ce nombre, on peut donc le mesurer par la méthode ordinaire du pont, en ayant soin de faire isoler l'extrémité éloignée du câble (fig. 328). Mais cette méthode est inapplicable en général, en raison du chiffre élevé qu'atteint l'isolement, à moins que l'on ne dispose d'une caisse de résistances à cur-

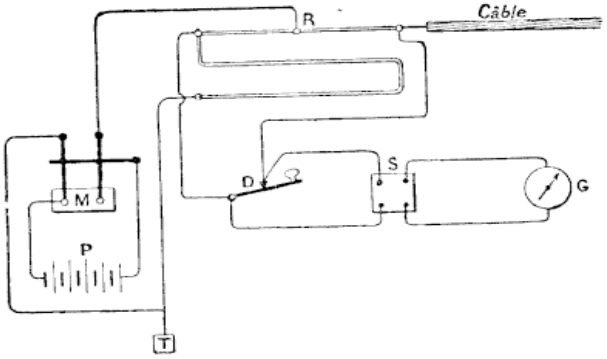


Fig. 328.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

seur de Thomson et d'une résistance auxiliaire considérable. Les communications sont établies comme l'indique la fig. 323, l'extrémité éloignée du câble étant isolée.

Dans les autres cas, on a recours à l'une des méthodes suivantes.

MÉTHODE DE SIEMENS

On charge le câble, isolé à l'extrémité éloignée, avec une pile d'au moins 100 éléments (fig. 329); à cet effet, la clef D étant abaissée d'abord, on

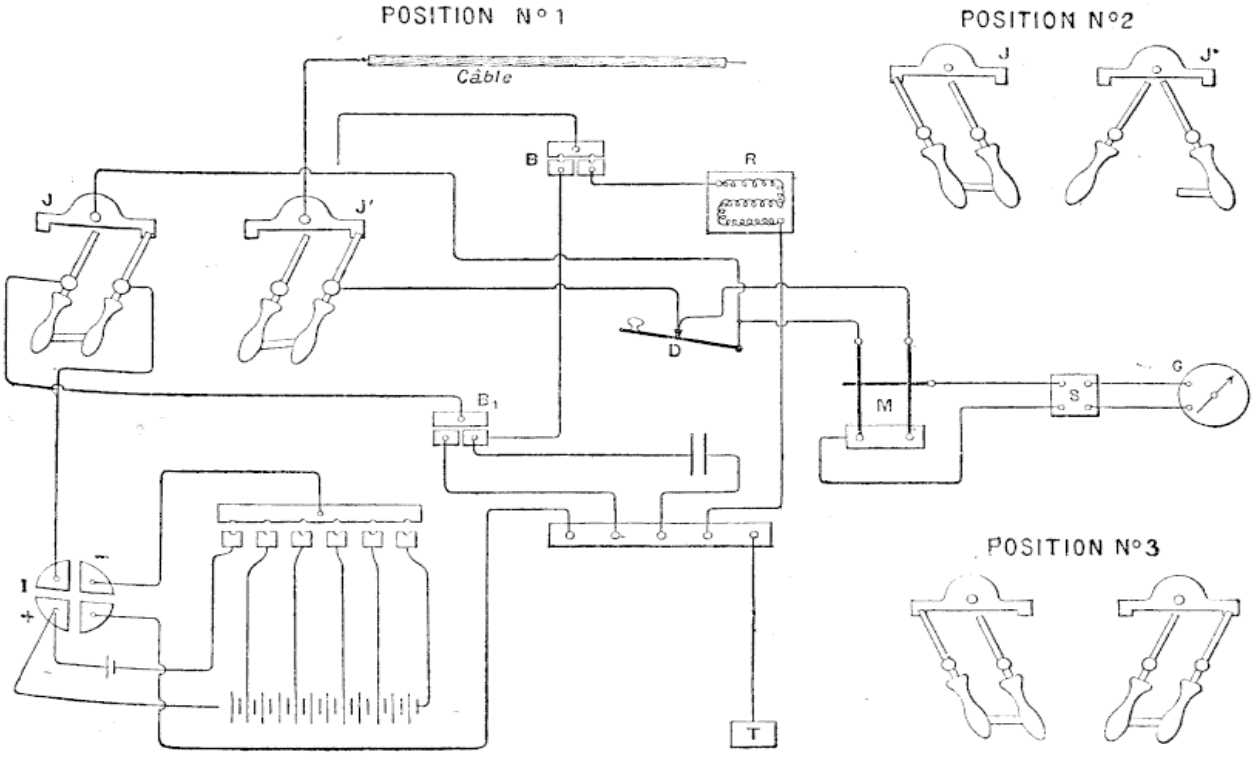


FIG. 329.

amène successivement les clefs J' et J sur leurs contacts de droite, on lit la déviation d correspondant à la première impulsion de l'aiguille et on relève immédiatement la clef D. Au bout de quinze à vingt secondes, lorsque la charge est complète, on tourne successivement les clefs J' et J de manière à leur faire occuper la position n° 2; le câble reste ainsi isolé pendant une minute. Enfin on décharge le câble à la terre à travers le galvanomètre, en abaissant D et tournant ensuite J' et J (position n° 3); on lit la déviation d_1

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour la première impulsion de l'aiguille. On peut aussi remettre les clefs dans la première position ; le câble reprend sa charge complète et la déviation de l'aiguille correspond à la partie de la charge qu'il a perdue pendant la minute d'isolement : il est donc facile de trouver par différence la charge restante.

Si nous désignons maintenant par

V le potentiel de la pile qui a été mise en communication avec le câble,

v le potentiel de la charge restant dans le câble t secondes après que celui-ci a été isolé de la source électrique,

C la capacité du cable,

R la résistance d'isolement au bout du temps t,

le courant de décharge à travers l'enveloppe isolante aura, à ce moment, une intensité égale à $\frac{v}{R}$. La quantité d'électricité qui s'échappera du câble dans le temps dt sera donc $\frac{v}{R}\,dt$; elle est aussi représentée par C dv, et puisque v diminue lorsque t augmente

$$-C\,dv = \frac{v}{R}\,dt$$

d'où en intégrant

$$-\log_e v = \frac{t}{CR} + \text{constante}$$

$\log_e$ représentant des logarithmes népériens. V et v correspondant aux valeurs 0 et t du temps

$$R = 0{,}4343\,\frac{t}{C\log\frac{V}{v}} \qquad (1)$$

log représentant les logarithmes à base décimale.

Dans cette formule, si t est exprimé en secondes et C en microfarads, R représentera des megohms. Les potentiels V et v n'y entrant que par leur rapport, on peut substituer à ce rapport celui des charges correspondantes et par suite celui des déviations d et d_1 que l'aiguille a prises dans les premières impulsions correspondantes. L'isolement du câble au bout de la première minute est donc

$$R = 26{,}06\,\frac{1}{C\log\frac{d}{d_1}}$$

Il est généralement utile de modifier le shunt pendant que le câble est isolé, de manière à obtenir une bonne déviation soit pour le courant de charge, soit pour le complément du courant de charge,

Perte de charge.

On compare quelquefois la valeur relative des câbles, par le temps qu'ils mettent à perdre la moitié de leur charge. Si nous désignons par Q la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

charge complète du câble au temps 0, par q cette charge au bout d'un temps t et par T le temps nécessaire pour que Q acquière la valeur $\frac{Q}{2}$, la formule (1) donnera, en remplaçant le rapport des potentiels $\frac{V}{v}$ par celui des charges $\frac{Q}{q}$ et supposant l'isolement constant

$$T = \frac{0,30103}{\log Q - \log q} t \qquad (2)$$

On voit encore par la formule (1) que, pour des intervalles de temps égaux, $\frac{Q}{q}$ reste constant : le câble perd donc, dans des temps égaux, une même fraction de la charge qu'il possède au commencement de chacun de ces temps. Si nous désignons par n la perte pour cent correspondant au temps t, nous aurons

$$\frac{Q - q}{Q} = \frac{n}{100}$$

d'où

$$\frac{Q}{q} = \frac{100}{100 - n}$$

Substituant dans (2) il vient

$$T = \frac{0,30103}{2 - \log (100 - n)} t$$

formule due à M. Preece. Le câble atlantique de 1866 perdant 3 p. 100 de sa charge en 2 minutes 52 secondes, on a

$$T = \frac{0,30103 \times 172}{2 - \log 97} = 3913 \text{ secondes} = 1 \text{ heure, } 5 \text{ minutes, } 13 \text{ secondes.}$$

Pour s'assurer par l'expérience de l'exactitude de ce résultat, après avoir procédé comme il a été expliqué plus haut, on recharge le câble, puis on le laisse bien isolé. On charge d'un autre côté, avec la même pile qui a servi au câble, un condensateur que l'on met ensuite, pendant un instant, en communication avec un second condensateur ayant exactement la même capacité; la charge se divise en deux moitiés égales entre les deux condensateurs, et celle restant sur chacun d'eux a un potentiel moitié de celui de la pile. Si donc, au bout du temps T indiqué par le calcul pour faire tomber la charge du câble à la moitié de sa valeur, on met l'un des condensateurs en communication avec le câble et si T est correct, le galvanomètre ne doit donner aucune déviation. Généralement une petite charge passe du câble au condensateur ou inversement et il faut recommencer l'opération. En employant un condensateur de petite capacité (0,2 microfarad environ), de telle sorte que la charge qui passe du câble au condensateur ou réciproquement, aux environs de l'équilibre, soit très faible, et faisant quelques essais avant et après l'expiration du temps T, on arrive, par une interpolation facile, à déterminer ce temps très exactement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le tableau ci-dessous [1], dressé d'après des données fournies par l'observation directe, indique, pour le câble atlantique de 1866, les temps nécessaires à la déperdition, par centièmes, de sa charge, jusqu'à l'instant où elle tombe à la moitié de sa valeur originaire.

Essais électrométriques faits avec une pile de 100 éléments sur le câble atlantique de 1866.

PERTE de charge p. 100	TEMPS		PERTE de charge p. 100	TEMPS		PERTE de charge p. 100	TEMPS	
	minutes	secondes		minutes	secondes		minutes	secondes
0	0	0	10	7	41	44	52	0
3	2	52	20	17	26	45	54	13
4	3	29	30	28	31	46	56	20
6	4	57	40	43	49	47	58	11
7	5	39	41	45	45	48	60	50
8	6	21	42	47	45	49	63	21
9	7	10	43	50	10	50	66	41

MÉTHODE DE SUBSTITUTION

On mesure avec un galvanomètre à miroir les déviations δ et Δ produites par une même pile : 1° dans un circuit dont la résistance est un megohm et 2° dans le câble isolé. R étant la résistance d'isolement du câble, on aura, en vertu de la loi d'Ohm.

$$\frac{\delta}{\Delta} = \frac{R}{1}$$

d'où

$$R = \frac{\delta}{\Delta} \text{ megohms}$$

Ces expériences qui réclament beaucoup de soins sont généralement conduites de la manière suivante :

Mesure de la constante.

On donne le nom de *constante* du galvanomètre au nombre de divisions dont la pile d'expériences fait dévier l'aiguille aimantée dans les conditions où l'instrument est installé, lorsque la résistance de tout le circuit est exactement d'un megohm. Il est manifeste que ce même nombre exprime en megohms la résistance du circuit dans lequel le galvanomètre, avec la même pile, dévierait d'une seule division.

[1] Culley. *Handbook of practical telegraphy.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On mesure par l'une des méthodes que nous avons exposées plus haut (on préfère ordinairement celle de la demi-déviation) : 1° la résistance r d'un élément étalon, et 2° la force électromotrice n de la pile d'expériences en fonction de l'élément étalon.

Les appareils étant disposés comme l'indique la figure 329, une caisse de résistances est attachée au sommet de la clef J' et on mesure la déviation d donnée par le galvanomètre avec l'élément étalon : cette déviation doit être la même par le courant positif ou négatif.

Si R désigne la résistance débouchée, que l'on prend la plus grande possible (on se sert même généralement de caisses spéciales contenant soit 100 000 ohms, soit un megohm), G la résistance du galvanomètre, S celle du shunt employé, on aura

$$\text{Constante} = \frac{\left(R + r + \frac{G\,S}{G + S}\right) \times d, \frac{G + S}{S} \times n}{10^6} \text{ megohms}$$

On note la température de la salle d'expériences et on en corrige, s'il y a lieu, la résistance des caisses.

Mesure de la perte par les appareils et par les fils de secours, du courant naturel du câble.

La perte des appareils et des fils de secours se mesure avec la pile d'expériences complète. Lorsqu'on veut la perte des appareils seule, on laisse le sommet de la clef J' isolé (1re position) et on abaisse l'interrupteur D. Si l'on veut y ajouter celle du fil de secours dont on se servira pour amener le câble aux appareils, on attache en J' l'extrémité de ce fil dont on isole l'autre extrémité. La déviation obtenue est notée pour être retranchée de celle que donnera le câble. Les fils de secours ne sont employés que dans les usines ; dans les guérites d'atterrissements, le bout du câble est amené directement aux appareils. Le bout éloigné du câble doit toujours être soigneusement isolé, la gutta-percha retaillée et au besoin enduite de paraffine.

Lorsque le câble est immergé, il est parcouru par des courants terrestres dont le sens et l'intensité sont variables. Pour en déterminer la force électromotrice e, il suffit de décharger le câble dans un condensateur placé entre la clef J et la terre (cheville du commutateur bavarois B_1 en communication avec le bloc de droite, J et J' dans la position n° 3). On refait la même expérience en remplaçant le câble par l'élément étalon dont le deuxième pôle est mis directement à la terre (B attaché en J' au lieu du câble, chevilles de B et B_1 en communication avec les blocs de gauche, J et J dans la position n° 1). Si et représentent les déviations obtenues dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les deux cas, S et S' les shunts employés, e' la force électromotrice de l'élément étalon, on a

$$\frac{e}{e'} = \frac{\delta \frac{G+S}{S}}{\delta' \frac{G+S'}{S'}}$$

On peut aussi lire simplement la déviation δ donnée au galvanomètre par le courant du câble attaché en J' (3e position de J et J', la clef D abaissée). Si R désigne la résistance d'isolement du câble, on aura par la loi d'Ohm

$$\frac{e}{e'} = \frac{\delta \frac{G+S}{S} \times R}{\frac{\text{constante}}{n}}$$

Enfin, on peut attacher à une caisse de résistances (fig. 330), d'une part le galvanomètre suivi du câble isolé, d'autre part l'élément étalon, dont le

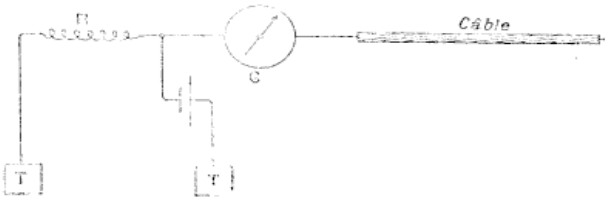


FIG. 330.

second pôle est à la terre, en mettant également à la terre l'extrémité opposée de la caisse. Si E et r désignent la force électromotrice et la résistance intérieure de l'élément étalon, R celle, débouchée dans la caisse, qui donne l'équilibre, on aura

$$e = \frac{R}{R+r} E$$

En comparant le sens de la déviation avec celui de la déviation donnée par un pôle déterminé de l'élément étalon, lorsque l'on abaisse le même ressort de la clef M, on reconnaît facilement la direction positive ou négative du courant du câble. On en tient compte dans le calcul des déviations servant à la mesure de l'isolement : si à l'extrémité où l'on opère le courant naturel est positif sortant du câble par exemple, on retranchera la déviation qu'il produit au galvanomètre de celle obtenue en chargeant le câble par le courant négatif, et inversement.

Électrification du câble, décharge.

Au commencement précis d'une minute, on charge le câble par le courant négatif de la pile d'expériences qui doit avoir au moins 100 éléments : les clefs J et J' sont dans la position n° 1 (fig. 329). La clef de court circuit D

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du galvanomètre est fermée pour éviter la secousse violente que le courant de charge donnerait au miroir de l'instrument. En expérimentant un câble de 500 milles marins de longueur, on n'introduit pas le galvanomètre dans le circuit avant que l'électrification n'ait duré vingt-cinq ou trente secondes et, à ce moment, on amène l'image lumineuse à sa position d'équilibre en frappant une série de petits coups sur la tête de l'interrupteur D. L'un des ressorts de la double clef M a été abaissé préalablement et maintenu par une cheville dans cette position.

On lit les déviations de quinze en quinze secondes pendant une demi-heure ou plus ; les moyennes des lectures faites à la fin d'une minute, quinze secondes avant et quinze secondes après, représenteront les valeurs exactes de la déviation correspondant à la fin de la minute. Jadis on mesurait généralement l'isolement après la première minute d'électrification ; mais, depuis un certain nombre d'années, l'usage s'est introduit de ne prendre cette mesure qu'après deux minutes d'électrification ; on donne même souvent la valeur de l'isolement après cinq minutes, dix minutes, quinze minutes, en spécifiant les temps auxquels les nombres se rapportent.

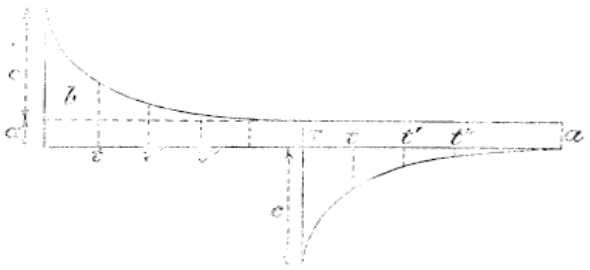


FIG. 331.

Dès que la dernière lecture avec courant négatif à la ligne est faite, on relève la clef de court circuit D et on met les clefs J et J' dans la position n° 3. Un courant de décharge très intense, que l'on évite avec soin de recevoir dans le galvanomètre, sort du câble et s'écoule à la terre. Ce flux d'électricité comprend la charge électrostatique du câble qui se dissipe rapidement ; on n'observe plus ensuite qu'un courant continu et très prolongé dû à l'électricité qui avait pénétré peu à peu jusqu'à une certaine profondeur dans l'intérieur du diélectrique, pendant la charge. Cette électricité s'écoule graduellement pendant la décharge, en reproduisant le phénomène bien connu dans les bouteilles de Leyde sous le nom de *charge résiduelle*.

L'intensité du courant de décharge dû à cette absorption d'électricité est, au bout d'un temps quelconque t compté à partir de la mise à la terre de la ligne, égale à celle du courant de charge observé au bout du même temps t après l'application de la pile à la ligne. Les courbes qui représentent, en fonction d'un temps, les intensités de ces deux courants, sont par suite exactement égales, mais disposées en sens inverse et on peut déduire l'une d'elles de l'autre. L'ordonnée a représente dans la figure 331 le courant constant et permanent de perte à travers le diélectrique. Aussi quelques électriciens,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au lieu de prendre les déviations observées à la fin des premières minutes pour le calcul de l'isolement, préfèrent ajouter aux déviations obtenues pendant les dernières minutes de l'envoi du courant de la pile celles données par le courant de décharge à la terre, pendant les premières minutes de la mise à la terre.

On intervertit la position des ressorts de la double clef M de manière à lire sur le même côté de l'échelle les déviations dues au courant de décharge. On abaisse, comme précédemment au bout de vingt-cinq à trente secondes, l'interrupteur D et on observe les déviations de minute en minute ou de demi-minute en demi-minute.

Lorsque le câble est complètement déchargé, on recommence les mêmes expériences avec le courant positif. Si, au moment de l'application de ce courant, il restait encore une petite charge négative résiduelle sortant du câble, on la noterait pour la retrancher de celle produite par la pile ; si le courant naturel positif sortant, observé au début de l'expérience, prédominait de nouveau, on ajouterait au contraire la déviation correspondante à celle due à la pile. Les nombres obtenus au bout de la première, deuxième... minute, sont corrigés comme précédemment et représentent les déviations que nous avons désignées plus haut par Δ et qui servent à calculer l'isolement.

L'intensité de la pile variant pendant le cours de ces expériences qui sont fort longues, on détermine à nouveau la constante lorsque la mesure de la décharge du câble par le courant positif est terminée, et on prend la moyenne des deux nombres.

EXEMPLE

Pour faire saisir plus facilement l'esprit de cette méthode et ses procédés de calcul, nous donnerons ci-dessous, à titre d'exemple, le détail des expériences que nous avons faites à Hussein-Dey, le 4 octobre 1880, pour la réception du câble Marseille-Alger de 1880.

Résistance du galvanomètre 7 790 ω. à 18°3 C ; fil des bobines en maillechort.

Température de la guérite 25°,3 C.

Température à laquelle sont ajustées les bobines de la caisse de résistances servant de shunt 18°,3 C.

Résistance de la pile.

Avec 1 000 ω de résistance en circuit, 108 éléments Leclanché donnent une déviation de 270°, le shunt du galvanomètre étant formé par un simple fil de cuivre. Pour réduire la déviation de moitié, les résistances débouchées sont 2 300 ω, d'où

Résistance de 108 éléments Leclanché : 300 ω.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comparaison des piles.

Capacité du condensateur : 1 microfarad.

Décharges dans le condensateur de

1	élément Leclanché	142	divisions s/ du galvanomètre	5000	ω
10	—	185	—	400	—
30	—	224	—	160	—
70	—	150	—	45	—
108	—	225	—	45	—

Le coefficient d'augmentation de résistance du maillechort étant de 0,0004 environ par degré centigrade, la résistance du galvanomètre au lieu de 7790 ω est de 7811,8 ω et celle du premier shunt, au lieu de 5000 ω, est de 5103,8 ω ; le pouvoir multiplicateur de ce dernier est donc

$$\frac{7811,8 + 5013,8}{5013,8} = 2,55$$

La décharge du premier élément dans le condensateur donne par suite une déviation de

$$142 \times 2,55 = 362 \text{ divisions}$$

En procédant de même pour les autres décharges, et prenant leurs rapports à la première, on trouve que les forces électromotrices des diverses parties de la pile sont proportionnelles aux nombres

1 10,4 30,6 71,9 107,9

Les différents éléments de la pile peuvent donc être considérés comme se trouvant dans une situation à peu près normale.

Force électromotrice du courant du câble.

Décharge de 1 élément Leclanché dans le condensateur : 362 divisions.

Décharge du courant du câble dans le condensateur : 120 divisions sans shunt, négatif sortant,

d'où la force électromotrice du courant du câble est égale à

$$\frac{120}{362} \text{ élément Leclanché} = \frac{1}{2} \text{ volt environ}$$

Constante du galvanomètre.

108 éléments Leclanché donnent au galvanomètre s/ 3 ω, à travers une résistance de 100 000 ω une déviation de

223 divisions par courant négatif
222 — — positif

Donc

$$\text{Constante} = \frac{100000 + 300 + 3}{10^6} \times 222,5 \times \frac{7811,8 + 3,00828}{3,00828} = 57957 \text{ Ω}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Perte par les appareils.

Par courant négatif, 7 divisions sans shunt.

Par courant positif, 13 divisions sans shunt.

Courant du câble négatif sortant et donnant une déviation de 25 divisions sans shunt.

Courants de perte et de décharge du câble.

Envoi dans le câble du courant négatif de 108 éléments Leclanché, shunt du galvanomètre 519 ω. Déviations après

min.	15s	30s	45s	60s	Observations.
0	»	»	»	210	divisions.
1	195	186	179	173	
2	170	166	163	160	
3	159	154	155	153	
4	150	150	148	148	
5	148	147	145	144	
6	142	141	140	139	
7	138	138	137	136	
8	135	135	134	134	
9	»	133	134	132	Vérification du zéro.
10	131	130	130	131	
11	130	130	129	129	
12	129	129	128	127	
13	127	127	126	126	
14	125	125	124	124	
15	124	124	123	123	
16	123	123	123	122	
17	122	122	121	121	
18	121	120	120	120	
19	120	120	120	120	
20	120	120	120	120	
21	120	119	119	118	
22	118	118	118	118	
23	117	116	123	130	Le bureau d'Alger attaque par un fil voisin.
24	120	116	116	116	
25	116	116	115	115	
26	115	115	114	115	
27	114	114	114	113	
28	113	113	114	114	
29	114	112	112	111	

Décharge du câble à travers le galvanomètre s/ 1038 ω. Déviations obtenues après.

min.	div.	min.	div.	min.	div.	min.	div.	min.	div.	min.	div.
1	»	6	69	11	52	16	40	21	34	26	30
2	»	7	61	12	46	17	39	22	33	27	29
3	»	8	59	13	46	18	38	23	32	28	29
4	84	9	56	14	44	19	36	24	31	29	28
5	72	10	53	15	41	20	34	25	30	30	30

Courant du câble positif entrant, donnant 315 divisions sans shunt.

Envoi du courant positif de 108 éléments Leclanché, shunt du galvanomètre 519 ω. Déviations obtenues après

min.	15s	30s	45s	60s	Observations.
0	»	»	»	221	
1	204	195	189	183	
2	180	174	172	170	
3	166	166	163	161	
4	160	158	156	155	
5	153	152	151	150	
6	150	149	148	148	
7	147	146	146	145	
8	145	147	146	146	
9	145	144	142	143	
10	142	142	141	140	
11	140	140	139	139	
12	138	137	136	137	
13	137	136	136	135	
14	134	135	134	134	
15	134	134	134	134	
16	133	132	130	130	
17	130	129	129	129	
18	130	130	130	129	
19	»	»	»	»	Passage d'un train à côté de la guérite.
20	127	126	127	129	
21	125	127	127	127	
22	126	126	126	125	
23	125	125	125	124	
24	123	121	120	120	
25	120	120	120	120	
26	121	121	121	120	
27	120	120	120	120	
28	120	120	119	119	
29	119	120	120	119	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Décharge du câble à travers le galvanomètre s/ 1038 ω. Déviations obtenues après

min.	div.	min.	div.	min.	div.	min.	div.	min.	div.	min.	div.
1	190	6	56	11	37	16	29	21	20	26	20
2	114	7	49	12	34	17	27	22	20	27	16
3	83	8	48	13	31	19	26	23	20	28	17
4	71	9	43	14	31	18	23	24	21	29	20
5	60	10	39	15	30	20	21	25	19	30	15

Deuxième constante du galvanomètre 57769 Ω.

Isolement du câble après deux minutes d'électrification par le courant négatif.

$$\frac{\frac{57937 + 57769}{2}}{\frac{179 + 173 + 170}{3} \times \frac{7811{,}8 + 520{,}4}{520{,}4} - 7 + 25} = 20{,}69 \text{ megohms}$$

La longueur du câble étant de 487,783 milles marins, son isolement par mille marin après deux minutes, courant négatif, est

$$20{,}69 \times 487{,}783 = 10092 \text{ megohms}$$

On calcule ainsi le tableau suivant

Isolements par mille marin exprimés en megohms.

Durée d'électrification en minutes.	COURANTS négatif	positif
	Ω	Ω
1.	8371	8817
2.	10092	10814
3.	10969	11909
4.	11542	12494
5.	11850	13244

Décharge de 5 éléments Leclanché dans le câble :

Après 15 secondes d'électrification 230 divisions shunt 7 ω;

Après 15 secondes d'électrification et une minute d'isolement 228 divisions shunt 7 ω.

Le câble perd 0,87 p. 100 de sa charge par minute. Il perdrait la moitié de sa charge en $\frac{0{,}30103 \times 60}{2 - \log 99{,}13}$ secondes, ou 1 heure 19 minutes 19 secondes.

MÉTHODE DE JENKIN PAR L'ÉLECTROMÈTRE

On pourrait obtenir l'isolement d'un câble en mesurant, à l'électromètre, le potentiel V de la pile auquel on chargerait le câble et celui v de la charge

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui y resterait après t secondes d'isolement, et portant ces valeurs dans la formule de Siemens

$$R = \frac{0{,}4343\ t}{C \log \frac{V}{v}}$$

Mais avec des résistances très élevées, les différences entre V et v sont très faibles, à moins que l'on ne prolonge l'expérience pendant un temps t très grand; et même dans ces conditions les valeurs de V et v seraient limitées par la condition d'être contenues dans l'échelle de l'instrument, qui ne comprend, comme on sait, que 720 divisions. M. Fleeming Jenkin a imaginé de prolonger *virtuellement* l'échelle, de façon à compter les déviations à partir d'un zéro imaginaire très éloigné. En choisissant convenablement ce zéro dans chaque cas particulier, on peut arriver à obtenir toujours des déviations s'étendant sur toute la longueur de l'échelle réelle.

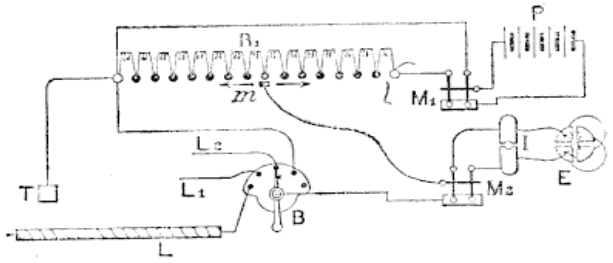


FIG. 332.

Supposons que l'un des pôles d'une pile de 100 éléments soit à la terre et l'autre relié à l'une des paires de quadrants de l'électromètre, la seconde paire de quadrants étant elle-même en communication avec le câble isolé à l'extrémité éloignée. Si l'on charge pendant quelques instants le câble au potentiel même de la pile, l'aiguille de l'électromètre restera d'abord au zéro; mais au fur et à mesure que la charge se perdra, la déviation augmentera. Si l'électromètre dévie de 100 divisions, par exemple, pour une différence de potentiel égale à la force électromotrice d'un élément de la pile, on obtiendra une déviation de 100 divisions sur l'échelle chaque fois que le potentiel du câble aura baissé d'un centième de sa valeur. La déviation sera de 200, 300, 400... divisions, lorsque ce potentiel diminuera de 2, 3, 4... p. 100; enfin si le potentiel devient nul, la déviation, en admettant que la construction de l'instrument le permît, atteindrait un point de l'échelle supposée prolongée suffisamment loin, que l'on appelle *zéro fictif*. Dans l'exemple que nous venons de considérer, le zéro fictif se trouverait à la division 10 000.

Dans la pratique, le pôle de la pile (fig. 332) qui est relié à une paire de quadrants, au lieu de rester isolé, est mis à la terre à travers une caisse de résistances R_1 à curseur m, assez grande pour que la pile ne puisse pas s'en trouver affaiblie sensiblement par la fermeture du circuit pendant la durée de l'expérience; une double clef à inversion M_1 permet d'établir ou d'inter-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rompre le courant et d'en changer le sens. Le curseur de la caisse est relié à une seconde double clef M_2 qui communique encore 1° par l'intermédiaire d'un interrupteur I avec les deux paires de quadrants de l'électromètre E ; 2° avec un commutateur B à plusieurs directions auxquelles on attache la terre T et les différents câbles L_1 L_2... à essayer et que l'on peut expérimenter simultanément.

Mode d'opération.

On électrifie l'électromètre à l'aide du rechargeur et on amène l'image lumineuse au zéro réel de l'échelle.

On fait glisser le curseur m de telle sorte que le rapport de la résistance $a\ c$ comprise entre le zéro et le curseur, à la résistance $a\ b = 100$, soit une fraction très simple : on choisit ordinairement $a\ c = 10$, ce qui donne $\frac{1}{10}$ pour le rapport des deux résistances $a\ c$ et $a\ b$ et par suite pour la fraction de la pile qui sert à déterminer le zéro fictif. On enlève la cheville de l'interrupteur I, on place le commutateur B sur le bouton de terre, puis on abaisse successivement l'un des ressorts de la clef M_1 et l'un de ceux de la clef M_2. L'une des paires de quadrants se trouve ainsi en communication avec le curseur m, l'autre directement avec la terre : le produit par 10 de la division à laquelle s'arrête l'image lumineuse sur l'échelle représente la division Z correspondant au zéro fictif.

On reprend la même mesure en renversant les pôles de la pile, puis on rétablit les clefs M_1 et M_2 dans leur position normale ; on met la cheville dans l'interrupteur I et on fait glisser le curseur m jusqu'à la division 100 de la caisse R_1.

On abaisse de nouveau une des touches de M_1 et de M_2 et à l'heure fixée pour le commencement de la charge, on fait tourner la manette du commutateur B de manière à mettre son axe et par suite la pile complète P en communication avec le câble L à essayer : une charge de 15 secondes suffit ordinairement pour 100 milles de câble. Au bout de ce temps, on retire la cheville de l'interrupteur I ; à mesure que le potentiel du câble décroît, l'index lumineux s'éloigne davantage, sur l'échelle, du zéro de la graduation. Si l'on veut avoir l'isolement au bout de la seconde minute, par exemple, on prend les déviations d_1 et d_2 correspondant aux temps 1 minute 45 secondes et 2 minutes 15 secondes à partir du premier contact de la pile avec le câble et on les porte dans la formule

$$R = \frac{0{,}4343 \times 30}{C\,[\log (Z - d_1) - \log (Z - d_2)}$$

On ferait les lectures aux temps 4 minutes 45 secondes et 5 minutes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

15 secondes et on porterait les déviations dans la formule ci-dessus, si l'on voulait avoir l'isolement au bout de la cinquième minute.

Dans le cas où, par suite d'une chute exceptionnelle de potentiel, l'index lumineux sortirait des limites de l'échelle réelle, on l'y ferait rentrer en faisant glisser le curseur m vers le zéro de la caisse ; on ajouterait alors à chacune des lectures faites sur l'échelle le nombre de divisions correspondant au déplacement permanent du curseur.

Les mesures ainsi prises sont d'une netteté remarquable, n'étant pas troublées par les variations du courant de la pile d'essais, et d'une délicatesse merveilleuse qu'on peut accroître pour ainsi dire indéfiniment en augmentant la sensibilité de l'instrument, la puissance de la pile et l'intervalle de temps qui sépare les deux lectures. On peut en outre avec un seul instrument procéder, dans les usines, simultanément aux essais d'un grand nombre de câbles.

EXEMPLE

Essai d'un câble en caoutchouc de Hooper, à la température de 24° C.
Capacité du câble par mille marin 0. 43 microfarad.
Pile de 100 éléments.

Position de l'index lumineux à l'origine	100	divisions ;
Position avec le potentiel du dixième de la pile (le curseur m étant à la bobine n° 10)	650	—
Différence	550	—
Produit par 10 de ce nombre	5 500	
A ajouter le nombre de divisions comprises à l'origine entre l'index lumineux et le zéro de l'échelle	100	
Zéro fictif	5 600	

Temps comptés à partir du premier contact de la pile avec le câble.	Lectures sur l'échelle.	Différences $Z - d$.	Logarithmes des deux différences $Z - d$.	Différence des deux logarithmes.
1^m45^s	354	5246	3,71983	0,00341
2^m15^s	395	5205	3,71642	

d'où

$$\text{Constante} = \frac{0,4343 \times 30}{0,43} = 30,3$$

et

$$R = \frac{30,3}{0,00341} = 8890 \text{ megohms par mille marin}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE DU DIÉLECTRIQUE

Soit l la longueur d'un câble dont la résistance d'isolement est R et ρ la *résistance spécifique* du diélectrique employé, c'est-à-dire celle d'un cube ayant pour côtés l'unité de longueur. Faisons dans le câble une section perpendiculaire à l'axe (fig. 333) et considérons la couche du diélectrique d'épaisseur dx située à la distance x de l'axe. Sa résistance sera

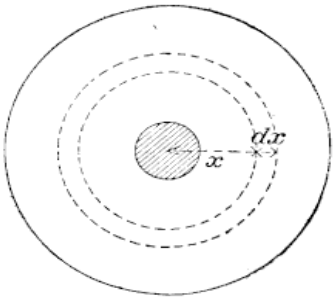


FIG. 333.

$$d\,\mathrm{R} = \rho \frac{d\,x}{2\,\pi\,x\,l}$$

Si donc d et D désignent les diamètres intérieur et extérieur de l'enveloppe isolante

$$\mathrm{R} = \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{\mathrm{D}}{2}} \rho \frac{d\,x}{2\,\pi\,x\,l} = \frac{\rho}{2\,\pi\,l} \log_e \frac{\mathrm{D}}{d}$$

d'où

$$\rho = 2{,}728 \frac{l \times \mathrm{R}}{\log \frac{\mathrm{D}}{d}}$$

log représentant les logarithmes vulgaires.

La résistance, à la température de 24° C., d'un cube d'un mètre de côté est, en moyenne, pour la gutta-percha, de

$$3{,}53 \times 10^6 \text{ megohms}$$

et pour le caoutchouc de Hooper

$$74{,}7 \times 10^6 \text{ megohms } (^1)$$

§ 3. — CAPACITÉ ÉLECTROSTATIQUE

La capacité électrostatique C d'un câble ou d'un conducteur quelconque est [2]

$$\mathrm{C} = \frac{2\,t \sin \frac{1}{2}\theta}{\pi\,\mathrm{R}}$$

[1] Jenkin. *Cantor lectures.*

Maxwell. *Electricity and Magnetism*, vol. II. p. 374.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

t représentant la durée d'une oscillation simple de l'aiguille du galvanomètre, lorsque l'instrument n'est traversé par aucun courant, θ l'angle d'écart de l'aiguille sous la première impulsion de la charge qu'une pile lance dans le condensateur, R la résistance du circuit dans lequel cette même pile produirait l'unité de déviation (1 division pour le galvanomètre à miroir).

Si l'on charge successivement deux condensateurs de capacités C et C' avec la même pile, et si θ et θ' sont les angles d'écart initiaux de l'aiguille

$$\frac{C}{C'} = \frac{\sin \frac{1}{2}\theta}{\sin \frac{1}{2}\theta'}$$

et avec un galvanomètre à miroir

$$\frac{C}{C'} = \frac{\theta}{\theta'} = \frac{n}{n'}$$

n et n' étant les divisions de l'échelle correspondant aux premières impulsions de l'aiguille.

De là, découle la méthode le plus universellement employée pour mesurer la capacité électrostatique d'un câble.

MÉTHODE PAR COMPARAISON DIRECTE

Si C' est exprimé en microfarads, et si S et S' sont les résistances des shunts employés pour obtenir les déviations initiales n et n'

$$C = \frac{n}{n'} \frac{\frac{G+S}{S}}{\frac{G+S'}{S'}} C' \text{ microfarads}$$

Les communications sont établies comme l'indique la figure 329, le condensateur étant attaché au sommet de la clef J'. On place les clefs J et J' dans la position n° 1, l'interrupteur D étant soulevé, et on charge le condensateur pendant un temps déterminé, quinze ou vingt secondes ordinairement : pendant ce temps on abaisse l'interrupteur D, une cheville reliant le bloc supérieur du commutateur bavarois B_1 au bloc inférieur de gauche. A l'expiration du temps fixé, on tourne la clef J dans la position n° 3 et on lit la division à laquelle s'arrête l'index lumineux, à sa première impulsion. On recommence la même expérience avec le câble et on transporte les résultats obtenus dans la formule ci-dessus.

La capacité du câble par nœud est égale au quotient de sa capacité totale par sa longueur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a soin, ainsi que nous l'avons recommandé, de toujours réunir par une cheville les deux armatures du condensateur dès qu'il n'est plus en service.

MÉTHODE DE SIEMENS

Si la résistance d'isolement du câble est connue, sa capacité peut être mesurée par les mêmes expériences que celles qui ont été indiquées plus haut pour la mesure de l'isolement et on a

$$C = \frac{0{,}4343\ t}{R \log \frac{V}{v}}$$

MÉTHODE DE GOTT

On forme une sorte de pont de Wheatstone avec le câble isolé (fig. 334), un condensateur de capacité C_1 et une caisse de résistances à curseur de Thomson et Varley. L'une des extrémités de cette caisse est mise à la terre, l'autre reliée à l'une des armatures du condensateur et à la pile dont le pôle

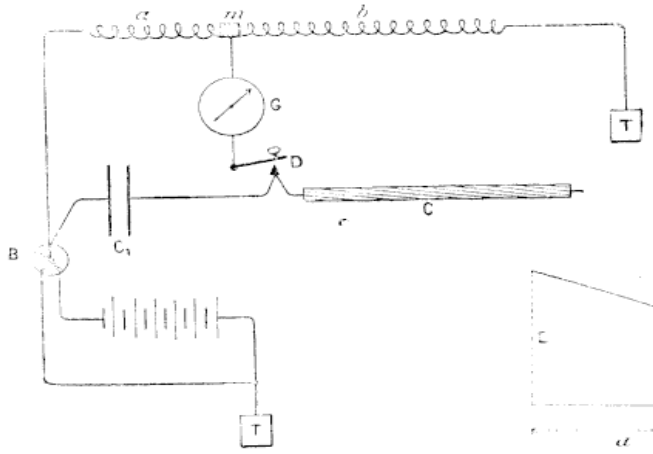


Fig. 334.

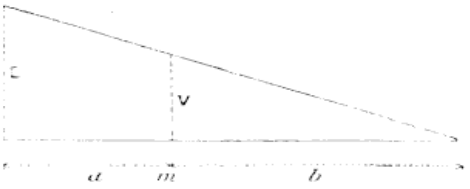


Fig. 335.

opposé est à la terre. Le galvanomètre est relié d'une part au curseur m et d'autre part au point de jonction de la seconde armature du condensateur et du câble. D est un interrupteur, B un commutateur.

On établit d'abord le contact avec la pile en B; cinq secondes après, on abaisse la clef D. Si l'aiguille du galvanomètre dévie, on relève D, on tourne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la manette du commutateur sur le bouton de terre, on déplace le curseur de la caisse de résistances et on recommence l'expérience. Lorsque l'équilibre est établi, et que a et b représentent les résistances des deux parties de la caisse, la capacité C du câble

$$C = \frac{a}{b} C_1$$

Si l'on désigne en effet par E la force électromotrice de la pile, par V le potentiel en m lorsque l'équilibre est établi (fig. 335)

$$\frac{V}{E} = \frac{b}{a+b}$$

d'où

$$V = E \frac{b}{a+b}$$

D'un autre côté, si Q représente la quantité d'électricité répandue sur chaque armature du condensateur,

$$C_1 = \frac{Q}{E - V} = \frac{Q}{E\left(1 - \frac{b}{a+b}\right)}$$

d'où

$$Q = \frac{a\ E\ C_1}{a+b}$$

Mais le câble contenant exactement la même quantité Q d'électricité mise en liberté sur la seconde armature du condensateur

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{E\frac{b}{a+b}}$$

Par suite

$$Q = \frac{a\ E\ C_1}{a+b} = \frac{b\ E\ C}{a+b}$$

d'où

$$C = \frac{a}{b} C_1$$

MÉTHODE DE THOMSON

Les communications étant disposées comme l'indique la figure 336 dans laquelle R_1 et R_2 représentent deux caisses de résistances, C_1 un condensateur de capacité connue et P une pile de 1 à 10 éléments parfaitement isolée, on abaisse la clef D_1. Si V_1 et V_2 désignent les potentiels aux points a

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et b dans le circuit a P b T, R_1 et R_2 les résistances débouchées dans les deux caisses

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

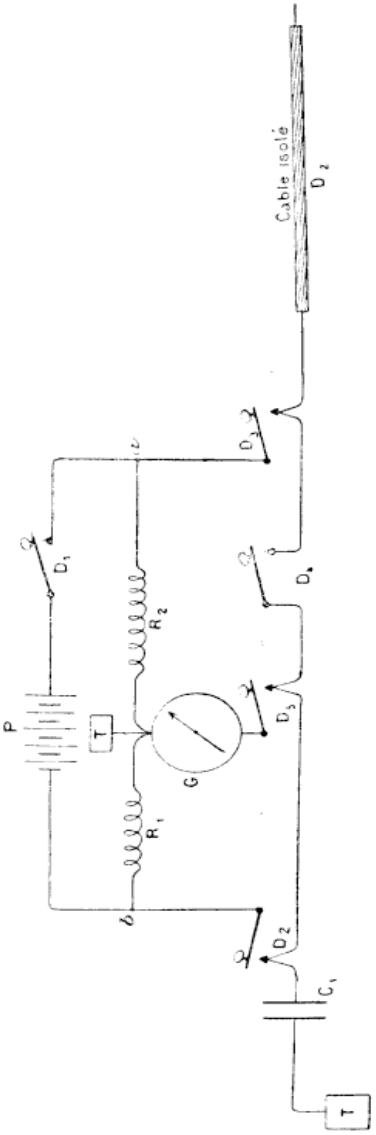


Fig. 336.

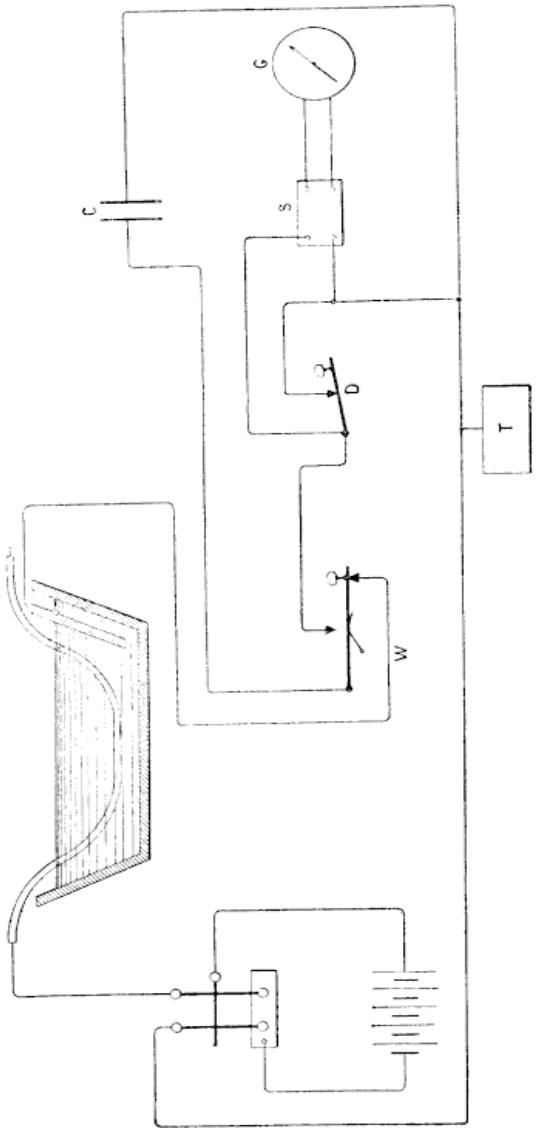


Fig. 337.

On abaisse simultanément les clefs D_2 et D_3; le condensateur et le câble se chargent de quantités d'électricité Q_1 et Q_2 aux potentiels respectifs V_1 et V_2. Si leurs capacités en microfarads sont C_1 et C_2, nous aurons

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1 V_1}{C_2 V_2}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On relève D_2 et D_4 et on abaisse D_3 : si la charge Q_1 n'est pas égale à la charge Q_2, en abaissant D_3, le galvanomètre dévie. On fait varier le rapport de R_1 à R_2 et on recommence l'expérience jusqu'à ce que l'on obtienne l'équilibre. On a alors

$$C_2 V_2 = C_1 V_2 \frac{R_1}{R_2}$$

ou

$$C_2 = C_1 \frac{R_1}{R_2} \text{ microfarads}$$

Ordinairement on fait varier la résistance R_1 seule, et on donne à R_2 une valeur fixe qui peut être de 1 000 ohms, lorsque l'on opère sur de très longs câbles. La capacité C_1 du condensateur peut atteindre alors 100 microfarads : on la mesure par fractions que l'on compare successivement à un condensateur étalon de 1/3 ou 1 microfarad. Pour obtenir des résultats comparables avec des condensateurs formés souvent de diélectriques d'espèces différentes, on les charge pendant un temps déterminé, 15 secondes, et on les met en communication entre eux pendant 4 secondes.

La durée de la charge, pour des câbles d'une longueur de 1 000 milles marins et au-dessus, doit atteindre 5 minutes : les charges du câble et du condensateur sont mises en communication pendant 10 secondes [1].

Lorsque le câble est parcouru par des courants naturels, on prend la moyenne d'une série d'expériences faites en inversant successivement les pôles de la pile : le câble est mis à la terre pendant quelques minutes après chaque expérience.

CAPACITÉ ÉLECTROSTATIQUE SPÉCIFIQUE

La capacité C d'un câble est, d'après la formule de sir W. Thomson [2],

$$C = \frac{1}{2} \frac{l K}{\log_e \frac{D}{d}}$$

l désignant la longueur du câble,

K le rapport de la capacité du diélectrique employé à celle de l'air prise pour unité,

D et d les diamètres extérieur et intérieur de l'âme,

$\log_e$ les logarithmes népériens.

[1] J. Munro and A. Jamieson's *Electrical Tables and Rules*.

[2] Maxwell. *Electricity and Magnetism*, vol. I, p. 155.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si Γ représente la capacité électrostatique spécifique ou par unité de volume du diélectrique, on a [1]

$$\Gamma = \frac{1}{4\pi} K$$

d'où

$$\Gamma = \frac{C \log \frac{D}{d}}{2\pi l} = \frac{C \log \frac{D}{d}}{l \times 2.728}$$

log désignant les logarithmes vulgaires.

§ 4. — ESSAIS DES SOUDURES

Les essais des soudures des câbles se font aujourd'hui exclusivement par la méthode dite d'*accumulation*, due à M. Latimer Clark et qui consiste à comparer le joint à une longueur déterminée, 2 mètres ordinairement, d'âme de la même fabrication, en parfait état.

On emploie soit un galvanomètre, soit un électromètre.

1° Essai au galvanomètre.

On place la soudure dans une cuvette en gutta-percha (fig. 337) parfaitement isolée, contenant de l'eau de mer : l'une des extrémités du câble est isolée, l'autre reliée à une pile très puissante, 200 ou 300 éléments. Dans la cuvette plonge une plaque de cuivre reliée à un condensateur que l'on peut décharger à la terre à travers un galvanomètre. On envoie le courant de la pile pendant une demi-minute; on décharge ensuite le condensateur. On remplace le câble par 2 ou 3 mètres d'âme et on recommence l'essai. Si la déviation n'est pas sensiblement inférieure à la première, la soudure est considérée comme bonne.

2° Essai à l'électromètre.

L'une des paires de quadrants de l'électromètre (fig. 338) est reliée à la plaque de cuivre d'une part, et d'autre part à l'un des contacts S d'un commutateur rond B : la seconde paire de quadrants est mise à la terre. P_1 est une pile de 10 éléments, P_2 la pile d'essai de 200 ou 300 éléments. W_1 et W_2 sont deux clefs de Webb.

On vérifie d'abord l'isolement de la cuvette avant d'y placer le câble. A cet effet, on abaisse W_1 et on porte la manette de B sur le contact S. La pile P_1 charge l'électromètre dont l'aiguille dévie. W_1 restant abaissé, on isole S et on observe pendant deux minutes la déviation de l'électromètre :

[1] Maxwell, loc. cit., p. 152.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

si elle ne diminue que de quelques divisions, la cuvette est suffisamment bien isolée.

W_1 étant relevé, on porte la manette B sur le contact S, de manière à décharger l'instrument. On place la soudure dans la cuvette, on interrompt la communication B S et on abaisse W_2 : l'aiguille de l'électromètre dévie brusquement sous l'influence de la charge du câble, montrant ainsi que toutes les communications sont correctement établies. On met un instant la manette B en contact avec S pour décharger l'électromètre, puis on l'en sépare et on note au bout de deux minutes la déviation de l'index lumineux, sous l'influence de la déperdition de l'électricité à travers la soudure.

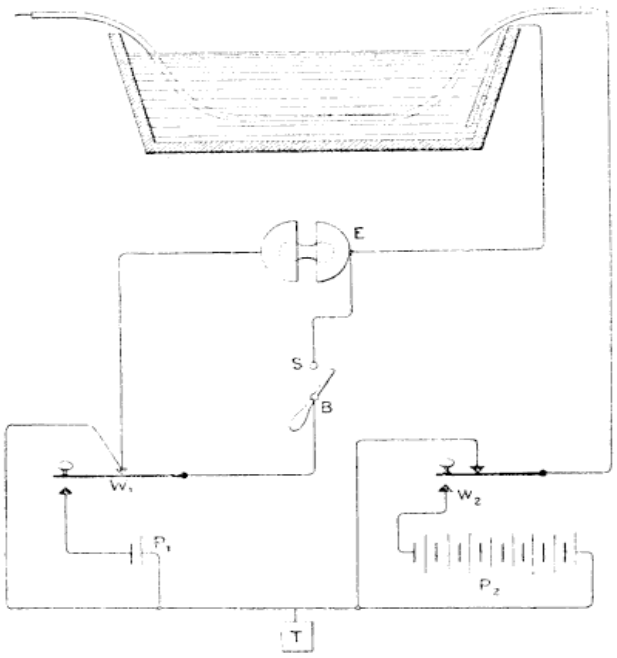


FIG. 338.

Cette déviation est comparée à celle que donne, dans les mêmes conditions, la pièce de 2 mètres d'âme servant d'étalon.

§ 5. — ESSAIS PENDANT L'IMMERSION DES CABLES

PREMIER PROCÉDÉ

A bord, les communications sont disposées comme pour la mesure de l'isolement (fig. 329) et on envoie en permanence, dans le câble isolé à la guérite de terre, le courant d'une pile de 100 éléments : on observe constamment la déviation de l'aiguille du galvanomètre marin G.

A terre (fig. 339), un levier L pouvant osciller entre deux pointes *a* et *b* est mis en communication avec la première armature d'un condensateur ; la seconde armature est reliée d'une part à la terre à travers un galvanomètre et d'autre part à la pointe *b* avec laquelle le levier L reste ordinairement en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

contact; à la pointe a est attachée l'extrémité du câble. Toutes les cinq minutes, le levier L est mis en contact, pendant dix secondes, soit à la main, soit par un mouvement d'horlogerie, avec la pointe a: le condensateur C se charge d'électricité et met en liberté une quantité égale d'électricité qui s'écoule à la terre à travers le galvanomètre G_2. Le poste de terre reconnaît ainsi la continuité du conducteur. Si l'angle d'impulsion de l'aiguille reste à peu près constant, on en conclut que l'état du câble ne varie pas. Lorsque le levier L revient se mettre en contact avec b, les charges contraires des deux armatures se recombinent directement en traversant L, sans troubler le galvanomètre.

Le flux d'électricité qui charge le condensateur à terre produit une petite impulsion sur le galvanomètre du bord; le navire est ainsi assuré également de la continuité de la communication.

D'heure en heure, on change le sens du courant de la pile à bord. On mesure la constante toutes les quatre heures : à cet effet, le câble est sim-

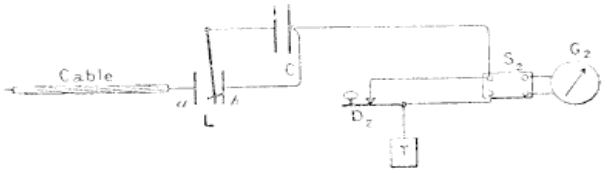


Fig. 339.

plement détaché de la clef J′ et remplacé par une caisse de résistances de 100 000 ohms; on lit les déviations données par les deux courants et on rétablit le câble dans sa position antérieure.

Toutes les quatre heures également, on met le câble à la terre, à la guérite, pendant dix minutes et le navire mesure la résistance du conducteur.

Lorsque le navire désire échanger une communication avec la terre, il renverse le sens de la pile, de telle sorte que le poste de terre reçoit des impulsions de sens contraire à celles qui devraient lui parvenir normalement; si l'on est à la fin d'une heure, on maintient au contraire le sens du courant. Le poste de terre, prévenu, met le câble en relation avec ses appareils de transmission : un condensateur est interposé entre la ligne et ces appareils de manière à laisser le câble toujours isolé. Quelquefois cependant, on met le câble à la terre; on y ajoute alors une très grande résistance, telle que celle d'une colonne d'eau contenue dans un tube de verre recourbé en U et dont on fait varier la longueur à volonté.

Lorsque c'est la terre qui désire appeler le navire, elle met le levier L en contact avec la pointe a plusieurs fois de suite : le navire perçoit de petites impulsions répétées à son galvanomètre et répond. Un intervalle de dix secondes sépare la transmission de chaque mot de celle du mot suivant,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour permettre au navire de prendre une mesure de l'isolement du câble et, au poste qui reçoit, d'accuser réception du mot.

Toutes ces communications s'effectuent aisément dans l'installation, représentée par la figure 340, qui avait été adoptée à bord de la *Dacia*, lors de l'immersion du câble Marseille-Alger de 1879 et dont les détails sont faciles à saisir.

Tous les jours, la guérite de terre transmet à bord l'heure du méridien principal du pays (Paris en France, Greenwich en Angleterre). A cet effet, elle appelle le navire à 11 heures 55 minutes et, lorsque celui-ci a répondu, lui envoie une série de points qui s'arrêtent exactement à midi. Le navire signale de son côté le chemin parcouru et le nombre de milles de câble dépensé. Aucune autre communication n'est échangée que sur l'ordre écrit des ingénieurs : toutes les transmissions doivent d'ailleurs être aussi brèves que possible.

L'isolement du câble augmentant au fur et à mesure de son immersion, par suite de l'abaissement de sa température et de la pression à laquelle il est soumis au fond de la mer, les déviations observées à bord et à terre diminuent graduellement. L'apparition d'une faute dans le câble produit, dans certains cas, un effet analogue ; mais on ne saurait établir aucune confusion entre les deux phénomènes. Si le conducteur en cuivre vient à se rompre à l'intérieur de l'enveloppe isolante, la déviation tombe *brusquement* à bord ; le courant ne se manifeste plus à terre au bout de la dizaine de minutes durant laquelle l'accident est survenu et réciproquement le navire n'observe pas, à ce moment, la petite impulsion due à la charge du condensateur de terre. Si la déviation au contraire augmente tout d'un coup et dans une plus ou moins large mesure, de façon à faire quelquefois même sortir l'index lumineux des limites de l'échelle, le conducteur en cuivre est en communication avec la mer par suite soit d'une rupture du câble, soit d'une faute de l'enveloppe isolante. Dans l'un et l'autre cas, l'électricien de service frappe immédiatement sur un gong qui est suspendu à la porte de la cabine d'expériences.

Si, après vérification des communications, la faute se trouve confirmée, on fait stopper le navire et on suspend la pose du câble. Le navire fait et prescrit au poste de terre, s'il peut communiquer avec lui, de faire les expériences nécessaires pour localiser rapidement et aussi exactement que possible la position de la faute. Les électriciens, à la guérite d'atterrissement, exécutent les ordres donnés et transmettent leurs résultats aux ingénieurs à bord qui seuls ont la direction des opérations.

Si la communication est impossible, le poste de terre, à l'expiration de la dizaine de minutes durant laquelle il a cherché à se mettre en relation avec le navire, isole le câble pendant dix minutes, puis le met à la terre pendant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

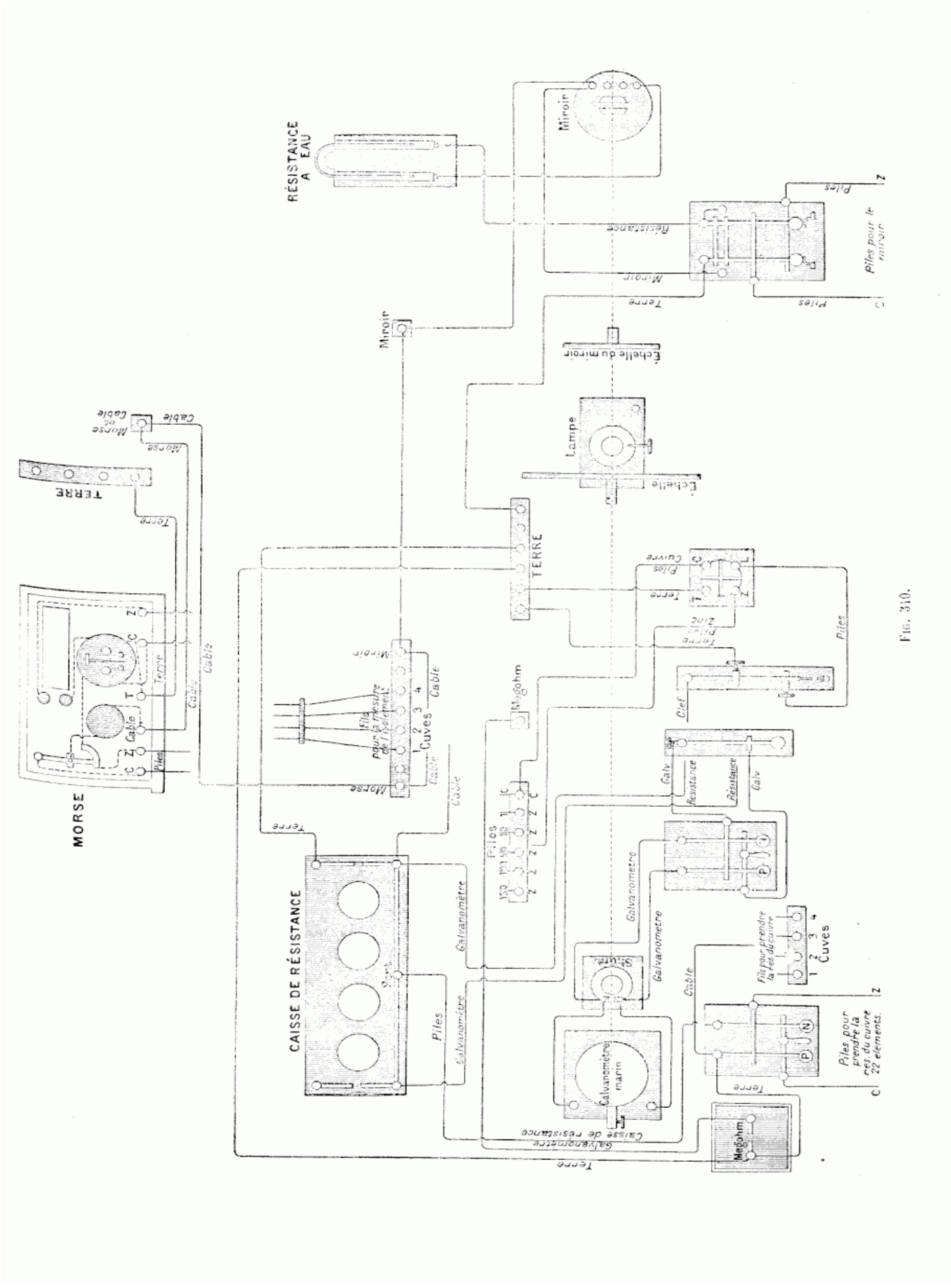


FIG. 310.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dix autres minutes. Il continue ainsi à l'isoler et à le mettre à la terre alternativement pendant dix minutes jusqu'à l'expiration de l'heure. Il cherche alors de nouveau, pendant dix minutes, à correspondre avec le navire. S'il ne peut y parvenir, il recommence à isoler et à mettre le câble à la terre de dix minutes en dix minutes, en continuant de la même manière, d'heure en heure, jusqu'à ce qu'il reçoive des signaux du navire. Si la communication n'est pas rétablie au bout de huit heures, le câble est mis à la terre, à travers un relais polarisé qui actionne une sonnerie d'alarme : le poste de terre rentre alors sur le récepteur à miroir pendant les dix premières minutes de chaque heure pour essayer de correspondre avec le navire. En outre, deux fois par jour, le matin à 9 heures et le soir à 6 heures, il prend deux séries de mesures de la résistance du cuivre du câble ; chaque série comprend six lectures ; l'une d'elles est faite avec le pôle négatif, l'autre avec le pôle positif d'une pile de 30 éléments. Tous les résultats obtenus, les mesures prises, les constatations faites sont exactement consignés, avec l'indication des heures correspondantes, sur un registre spécial.

L'aiguille du galvanomètre à bord est soumise, durant les opérations d'immersion ou de réparation d'un câble, à des mouvements d'oscillation réguliers, dus les uns au roulis du navire, les autres au déplacement dans le champ magnétique de la terre, du câble suspendu dans la mer ou enroulé dans les cuves : ces mouvements réguliers se distinguent facilement des déviations anormales dont nous venons de parler et avec lesquelles on ne doit pas les confondre.

Lorsque le câble comprend plusieurs conducteurs, on les réunit en un seul circuit que l'on traite ensuite comme un câble à un seul conducteur.

DEUXIÈME PROCÉDÉ

Ce procédé est employé pour la pose de très longs câbles : les dispositions en ont été imaginées par M. Willoughby Smith, lors de l'immersion du câble atlantique de 1866, et n'ont plus subi depuis lors que des modifications de détails.

A bord, l'installation est celle servant à la mesure de la résistance d'un câble à l'aide de la caisse de résistances à curseur de Thomson et Varley. La pile d'essais P_1 (fig. 341) comprend 100 éléments environ et la résistance R est très élevée. Les ressorts des trois commutateurs I_1, I_2, I_3, touchant tous leur contact n° 1 et les chevilles des trois interrupteurs K_1, K_2, K_3 étant en place, le courant de la pile P_1 est envoyé dans le câble par l'intermédiaire de la clef M_1 et interverti de 15 en 15 minutes ; l'équilibre est observé au galvanomètre G_1 et obtenu en déplaçant le curseur de la caisse R_1.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour mesurer la résistance du cuivre, lorsque le câble est mis à la terre à l'extrémité éloignée ou lorsqu'il se produit une rupture ou une faute acci-

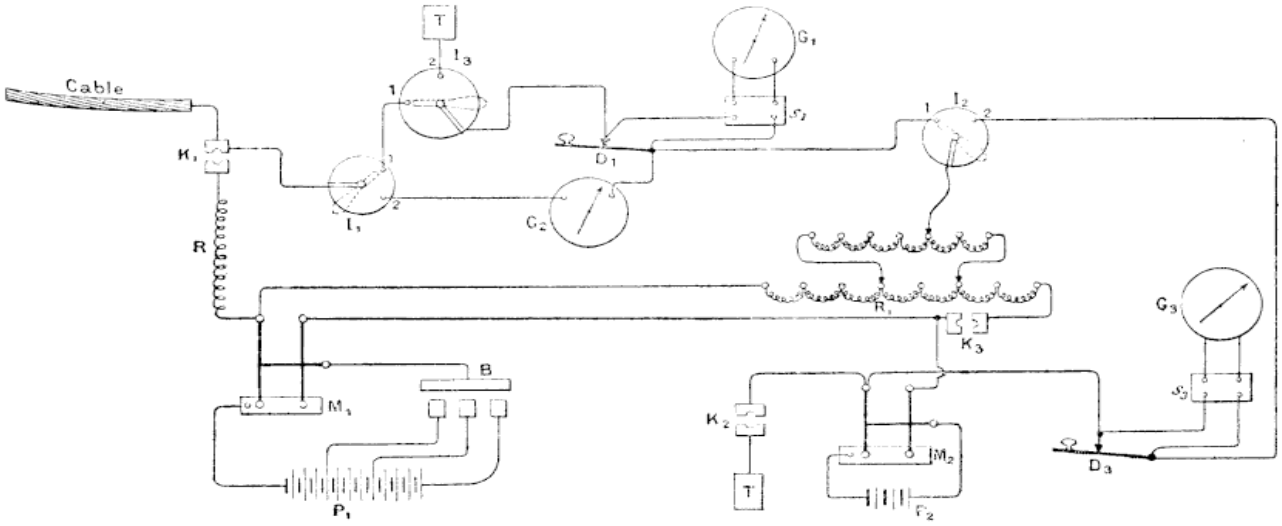


FIG. 341.

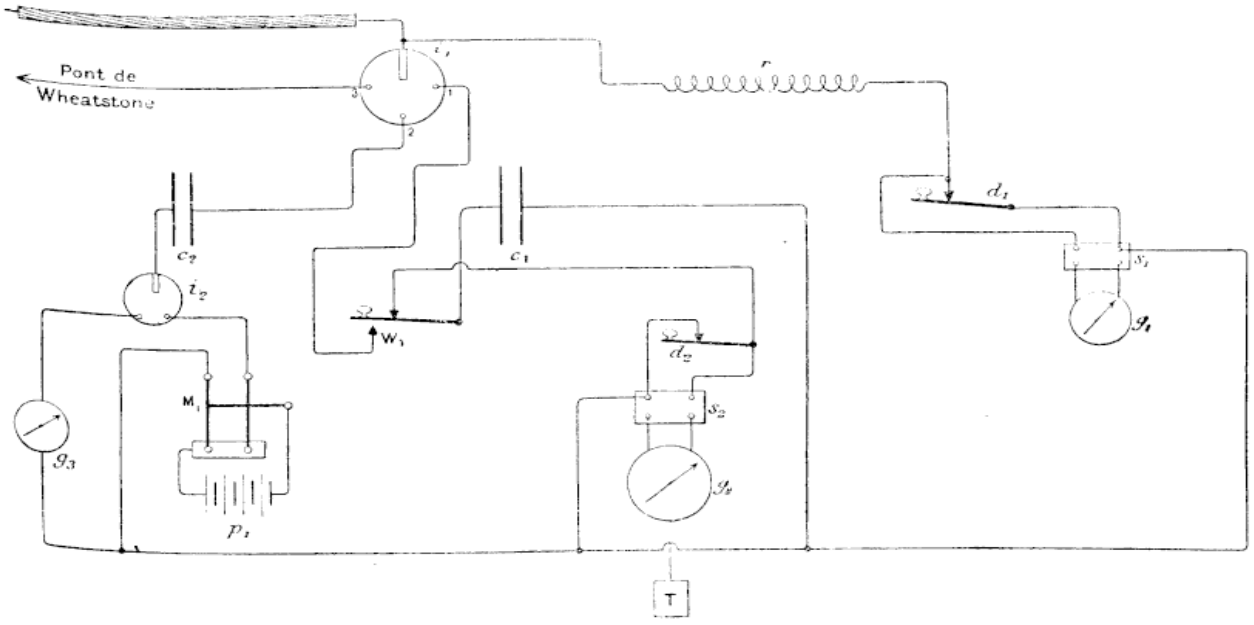


FIG. 342.

dentelle, on a simplement à déplacer les curseurs de la caisse de Thomson et à ajuster R_1, mais sans rien toucher aux communications : aucune fausse manœuvre ne peut ainsi se produire dans un moment critique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour transmettre au poste de terre, on amène le ressort de I_1 sur le contact 2, de manière à substituer le galvanomètre moins sensible G_2 à G_1 et on manipule avec la clef M_2 : le courant de la pile P_2 vient ainsi augmenter ou diminuer celui de P_1 et produit les signaux.

On vérifie l'état de la pile P_1 de quatre heures en quatre heures en la comparant à P_2 : à cet effet, on interrompt K_1 et K_2, on met I_2 sur son contact n° 2, et on procède, en se servant du galvanomètre G_2, comme il a été indiqué plus haut, page 357.

Lorsqu'on veut mesurer l'isolement du câble par la méthode ordinaire de substitution, on retire les chevilles de K_1 et K_3, on amène les curseurs aux zéros de R_1 et on lit la déviation de G_1. Pour mesurer la constante du galvanomètre, laissant K_1 et K_3 interrompus, on met le ressort de I_3 sur le contact n° 2 qui se trouve à la terre et on pousse les deux curseurs sur les divisions 100 de R_1 ; on lit la division correspondante de G_1.

A la guérite de terre, le câble (fig. 342) aboutit à un commutateur i_1 à plusieurs directions : il est en outre relié d'une façon permanente à la terre, par l'intermédiaire d'une résistance r en sélénium ou en gutta-percha de 20 à 30 megohms et d'un galvanomètre g_1. C'est à ce galvanomètre que l'on lit la déviation permanente due à la pile P_1 du navire, déviation qui change de sens de quinze en quinze minutes par l'inversion des pôles de la pile. On est ainsi assuré à terre de la continuité du conducteur; on perçoit à ce même galvanomètre les appels du bord. Le contact n° 1 de i_1 est relié à la clef de décharge W_1 que l'on manœuvre de cinq en cinq minutes pour la mettre successivement en communication avec le condensateur C et le galvanomètre g_2. On conclut, à terre, l'état du câble, de la grandeur de la décharge ; à bord, l'impulsion que produit au galvanomètre la charge du condensateur prouve la continuité du fil.

Pour communiquer avec le navire, le poste de terre, lorsque le premier répond à ses appels, amène le ressort de i_1 sur le contact n° 2 et transmet à l'aide de la double clef m_1 et de la pile p_1 ; le galvanomètre g_3 sert de récepteur. Le condensateur C_2 placé entre la pile p_1 et le câble laisse ce dernier toujours isolé. Un pont de Wheatstone qui n'est pas figuré sur le dessin, et dont le câble forme la quatrième branche, aboutit au contact n° 3 de i_1.

§ 6. — INSCRIPTION DES RÉSULTATS

Les principales formules sur lesquelles on reporte les résultats des essais électriques faits sur un câble, tant durant sa fabrication qu'avant, pendant et après son immersion, sont à peu près conformes aux types ci-dessous.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Résistance du cuivre des bobines d'âmes à 24° C.

MODÈLE N° 8

DATE	Numéros des bobines	Longueurs des bobines en milles marins	RÉSISTANCE EN OHMS — des fils de secours	RÉSISTANCE EN OHMS — des fils de secours et du conducteur	RÉSISTANCE EN OHMS — DU CONDUCTEUR SEUL — totale	RÉSISTANCE EN OHMS — DU CONDUCTEUR SEUL — par mille marin	Conductibilité du cuivre (celle du cuivre pur = 100)	OBSERVATIONS
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Signature :

Capacité électrostatique des bobines d'âmes

MODÈLE N° 9

Date	Numéros des bobines	Longueurs des bobines en milles marins	Nombre d'éléments de la pile	Condensateur — Shunt	Condensateur — Décharge	AMES — Shunt	AMES — Décharge après 10" d'électrification — des fils de secours	AMES — Décharge après 10" d'électrification — des fils de secours et des bobines	AMES — Décharge après 10" d'électrification — des bobines seules	AMES — Décharge après 10" d'électrification et 1' d'isolement — des fils de secours	AMES — Décharge après 10" d'électrification et 1' d'isolement — des fils de secours et des bobines	AMES — Décharge après 10" d'électrification et 1' d'isolement — des bobines seules	AMES — Perte pour cent	AMES — Capacité — totale par bobines	AMES — Capacité — par mille marin	OBSERVATIONS — Résistance du galvanomètre, capacité du condensateur, etc.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17

Signature :

Résistances d'isolement des bobines d'âmes à 24° C.

MODÈLE N° 10

Date	Numéros des bobines	Longueurs des bobines en milles marins	Nombre d'éléments de la pile	Résistance du galvanomètre	Résistance de la pile de .... éléments	CONSTANTE — Décharge dans un condensateur de — ..... éléments	CONSTANTE — Décharge dans un condensateur de — la pile entière	CONSTANTE — Rapport des piles	CONSTANTE — Déviations de ..... éléments à travers ..... ohms $s =$ ..... — par courant —	CONSTANTE — Déviations de ..... éléments à travers ..... ohms $s =$ ..... — par courant +	CONSTANTE — Déviations de ..... éléments à travers ..... ohms $s =$ ..... — Moyenne	CONSTANTE — Constante en megohms	AMES — Shunt	AMES — Déviations après 1 minute d'électrification — des fils de secours —	AMES — Déviations après 1 minute d'électrification — des fils de secours — +	AMES — Déviations après 1 minute d'électrification — des fils de secours et de la bobine —	AMES — Déviations après 1 minute d'électrification — des fils de secours et de la bobine +	AMES — Déviations après 1 minute d'électrification — de la bobine seule —	AMES — Déviations après 1 minute d'électrification — de la bobine seule +	AMES — Résistance d'isolement totale après 1' d'élect.	AMES — Isolement par mille marin après 1' d'élect.	OBSERVATIONS — (Inscrire la résistance et le nombre d'éléments de la pile servant à la mesure de la constante et la valeur du shunt.)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

Signature :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Essais des soudures des bobines d'âmes

MODÈLE N° 11

Numéros des bobines réunies successivement les unes aux autres (1)	Numéro d'ordre de la soudure (2)	Dates et heures de la confection des soudures (3)	Dates et heures de l'essai des soudures (4)	Délai écoulé entre la confection et l'essai des soudures (5)	Nombre d'éléments de la pile (6)	Perte de la cuvette : Décharge immédiate (7)	Perte de la cuvette : Décharge après 1/2 minute d'isolement (8)	Perte de la cuvette : Perte p. 100 (9)	Ame du câble : Longueur en essai (10)	Ame du câble : Accumulation par la perte après 1/2 minute de charge (11)	Ame du câble : Pertes de l'âme corrigées de la perte par la cuvette (12)	Soudures : Accumulation par la perte après 1/2 minute de charge (13)	Soudures : Pertes des soudures corrigées de la perte par la cuvette (14)	Différences entre les colonnes 12 et 14 (15)	OBSERVATIONS (16)

Signature :

Fabrication du câble de..... à.....

Résistance du conducteur en cuivre

MODÈLE N° 12

Dates (1)	Numéros des bobines reliées successivement (2)	Longueurs des bobines (3)	Longueurs en circuit : revêtues de l'armature en fer (4)	Longueurs en circuit : non revêtues de l'armature en fer (5)	Longueurs en circuit : totales (6)	Température : du câble armé (7)	Température : de l'âme non armée (8)	Résistance du conducteur seul : des fils de secours (9)	Résistance du conducteur seul : des fils de secours et du conducteur en circuit (10)	Résistance du conducteur seul : observée (11)	Résistance du conducteur seul : ramenée par le calcul à la température de 24° C. : totale (12)	Résistance du conducteur seul : ramenée par le calcul à la température de 24° C. : par mille marin (13)	Résistances calculées d'après les essais faits sur les bobines à 24° C. et en tenant compte de la diminution de longueurs par suite de la confection des soudures. : totales (14)	Résistances calculées d'après les essais faits sur les bobines à 24° C. et en tenant compte de la diminution de longueurs par suite de la confection des soudures. : par mille marin (15)	Différences entre les résistances observées et les résistances calculées à 24° C. : totales (16)	Différences entre les résistances observées et les résistances calculées à 24° C. : par mille marin (17)	OBSERVATIONS (18)

Signature :

Fabrication du câble de..... à .....

Capacité électrostatique de l'âme

MODÈLE N° 13

Dates (1)	Numéros des bobines reliées successivement (2)	Longueurs en milles marins de ces bobines après la confection des soudures (3)	Longueurs totales en circuit (4)	Nombre d'éléments de la pile (5)	Condensateur : Shunt (6)	Condensateur : Décharge (7)	Câble : Shunt (8)	Câble : Décharge après 10 secondes d'électrification : des fils de secours (9)	Câble : Décharge après 10 secondes d'électrification : des fils de secours et du câble (10)	Câble : Décharge après 10 secondes d'électrification : du câble seul (11)	Câble : Décharge après 10 secondes d'électrification et 1 m. d'isolement : des fils de secours (12)	Câble : Décharge après 10 secondes d'électrification et 1 m. d'isolement : des fils de secours et du câble (13)	Câble : Décharge après 10 secondes d'électrification et 1 m. d'isolement : du câble seul (14)	Câble : Perte p. 100 (15)	Câble : Capacité : totale (16)	Câble : Capacité : par mille (17)	Observations : Résistance du galvanomètre, capacité du condensateur (18)

Signature :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MODÈLE N° 14.

Fabrication du câble de..... à.....

Isolement du câble

Dates	1
Numéros des bobines reliées	21
Longueurs après confection des soudures	3
Longueurs en circuits — revêtues de l'armature du fer	4
Longueurs en circuits — non revêtues de l'armature du fer	5
Longueurs en circuits — totales	6
Température du câble — armé	7
Température du câble — non armé	8
Nombre d'éléments de la pile	9
Résistance du galvanomètre	10
CONSTANTE — Résistance de la pile de ..... éléments	11
CONSTANTE — Décharge dans un condensateur de ..... éléments — toute la pile	13
CONSTANTE — Rapport des piles	14
CONSTANTE — Déviations de ..... éléments à travers ....ohms S.... — −	15
CONSTANTE — Déviations de ..... éléments à travers ....ohms S.... — +	16
CONSTANTE — Déviations de ..... éléments à travers ....ohms S.... — Moy	17
CONSTANTE — Constante en megohms	18
CABLE — Shunt	19
CABLE — Déviations après.... minutes d'électrification — des fils de secours — +	20
CABLE — Déviations après.... minutes d'électrification — des fils de secours — −	21
CABLE — Déviations après.... minutes d'électrification — des fils de secours et du câble seul — +	22
CABLE — Déviations après.... minutes d'électrification — des fils de secours et du câble seul — −	23
CABLE — Déviations après.... minutes d'électrification — du câble seul — +	24
CABLE — Déviations après.... minutes d'électrification — du câble seul — −	25
CABLE — Résistances totales d'isolement après.... minutes d'électrification — observées	26
CABLE — Résistances totales d'isolement après.... minutes d'électrification — calculées pour la température de 24° C.	27
CABLE — Isolements par mille marin après.... minutes d'électrification — observées	28
CABLE — Isolements par mille marin après.... minutes d'électrification — calculées pour la température de 24° C.	29
Isolements calculés d'après ceux des bobines d'âmes essayées à 24° C — totaux	30
Isolements calculés d'après ceux des bobines d'âmes essayées à 24° C — par mille marin	31
Augmentation pour cent de l'isolement durant la fabrication	32
OBSERVATIONS	33
Signature :	

Câble de..... à.....

Essais électriques avant l'immersion.

MODÈLE N° 15.

Dates et heures	1
Longueur du câble en circuit	2
Température de la cuve contenant le câble	3
Résistance du conducteur — totale observée	4
Résistance du conducteur — par mille marin à 24° C.	5
Capacité électrostatique — totale	6
Capacité électrostatique — par mille marin	7
Perte de charge pour cent après 1 minute d'électrification	8
RÉSISTANCE DU DIÉLECTRIQUE — Nombre d'éléments de pile	9
après 1 minute de charge — par courant — totale	10
après 1 minute de charge — par courant — par mille marin	11
après 1 minute de charge — par courant — par mille marin ramenée à 24° C.	12
après 1 minute de charge — par courant + — totale	13
après 1 minute de charge — par courant + — par mille marin	14
après 1 minute de charge — par courant + — par mille marin ramenée à 24° C.	15
après 2 minutes de charge — par courant — — totale	16
après 2 minutes de charge — par courant — — par mille marin	17
après 2 minutes de charge — par courant — — par mille marin ramenée à 24° C.	18
après 2 minutes de charge — par courant + — totale	19
après 2 minutes de charge — par courant + — par mille marin	20
après 2 minutes de charge — par courant + — par mille marin ramenée à 24° C.	21
Augmentation pour cent de l'isolement depuis sa fabrication	22
OBSERVATIONS — Type du câble, Constante du galvanomètre, Température de la salle d'essais, etc.	23
Signature :	

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

NAVIRE : *le*..... *Câble de*..... *à*.....

Essais électriques à bord durant l'immersion.

MODÈLE N° 16.

DATES	HEURES	Longueur du câble en circuit	Nombre d'éléments de la pile : d'essais	Nombre d'éléments de la pile : de transmission	Rapport des piles	Pole de la pile en communication avec le câble	Résistance fixe R	Résistances de la caisse de Thomson et Varley : a	Résistances de la caisse de Thomson et Varley : 100000 — a	Isolement du câble en megohms : total	Isolement du câble en megohms : par mille marin	ISOLEMENT par la méthode de substitution : Constante : Déviation du galvanomètre	ISOLEMENT par la méthode de substitution : Constante : Valeur de la constante en megohms	ISOLEMENT par la méthode de substitution : Câble : Shunt du galvanomètre	ISOLEMENT par la méthode de substitution : Câble : Déviations du galvanomètre : —	ISOLEMENT par la méthode de substitution : Câble : Déviations du galvanomètre : +	ISOLEMENT par la méthode de substitution : Câble : Isolement moyen : total	ISOLEMENT par la méthode de substitution : Câble : Isolement moyen : par mille marin	Déviations dues à la charge du condensateur de la guérite	Résistance du cuivre	OBSERVATIONS : Transmissions de service etc.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	

Signature :

Câble de..... *à*.....

Essais électriques à la guérite de..... *durant l'immersion.*

MODÈLE N° 17.

Dates	Heures	Résistance r en circuit avec le câble	Déviation permanente du galvanomètre : Sens de la déviation	Déviation permanente du galvanomètre : Shunt	Déviation permanente du galvanomètre : Nombre de divisions	Décharge à la terre du condensateur chargé par le câble : Sens de la décharge	Décharge à la terre du condensateur chargé par le câble : Shunt	Décharge à la terre du condensateur chargé par le câble : Nombre de divisions	Résistance du cuivre	OBSERVATIONS	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

Signature :

Câble de..... *à*.....

Essais électriques à la guérite de..... *après l'immersion.*

MODÈLE N° 18.

Dates et heures	Longueur en milles marins de câble posé entre les deux guérites	Profondeur maximum de l'eau sur le parcours du câble	Pression par centimètre carré	Résistance du cuivre : mesurée : totale	Résistance du cuivre : mesurée : Par mille marin	Résistance du cuivre : calculée d'après la longueur du câble à 24° C.	Température moyenne de la mer calculée d'après les résistances du cuivre mesurées et calculées	Capacité électrostatique : totale	Capacité électrostatique : par mille marin	Résistance moyenne du diélectrique pour les deux courants — et + : Nombre d'éléments	Constante du galvanomètre	totale après : 1'	2'	5'	10'	30'	par mille marin après : 1'	2'	5'	10'	30'	Isolement après 1 minute par mille marin calculé d'après la température du câble et sa pression	OBSERVATIONS	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	

Signature :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XIV

DÉTERMINATION DE LA POSITION DES FAUTES

§ 1er. Classification des fautes. — Systèmes de protection électrique. — Courants du câble, de polarisation, telluriques.

§ 2. Le conducteur est en contact avec la mer sans être rompu. — Méthode de Blavier, — d'Anderson et Kennelly, — de Clark, — de Lacoine, — de Siemens, — d'Ayrton et Perry — de Jenkin. — Corrections de Hockin.
Essais par la boucle : méthode de Murray, — de Varley. — Correction de Taylor. Méthode de Warren.

§ 3. Le conducteur est en contact avec la mer et rompu. — Mesure par le pont de Wheatstone, — par la chute des potentiels. — Méthode de Lumsden, — de Clark, — de Kempe, — de Mance, — de Kennelly.

§ 4. Le conducteur est rompu ou présente en un de ses points une très grande résistance, sans être en contact avec la mer. — 1er cas. Méthodes ordinaires ; système Raynaud ; — 2e cas. Méthode d'Ayrton et Perry.

§ 5. Détermination des positions de deux fautes existant simultanément dans un cable.

§ 1er. — CLASSIFICATION DES FAUTES. — SYSTÈMES DE PROTECTION ÉLECTRIQUE

Les fautes que l'on observe dans l'âme des câbles sous-marins peuvent se diviser en trois classes :

1° Le conducteur en cuivre est en contact avec l'eau de la mer, par une fissure plus ou moins grande de l'enveloppe isolante, sans être rompu ;

2° Le conducteur en cuivre est en contact avec l'eau de la mer et rompu, auquel cas le câble est généralement rompu lui-même ;

3° Le conducteur en cuivre est rompu à l'intérieur de son enveloppe isolante ou présente en un de ses points une très grande résistance, sans que la déperdition d'électricité à la mer ait augmenté.

Dans un câble à plusieurs conducteurs, un contact peut se produire entre deux ou plusieurs conducteurs, avec ou sans rupture des fils. Cette circonstance se présente très rarement et les câbles à plusieurs conducteurs d'une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

certaine longueur sont eux-mêmes rares ; le cas échéant, on leur appliquerait sans difficulté l'une des méthodes d'essais que nous allons exposer.

Deux fautes enfin peuvent exister simultanément dans un même câble : la localisation de chacune d'elles est alors beaucoup plus difficile. En général, on répare les fautes d'une certaine gravité au fur et à mesure qu'elles se déclarent : dans quelques cas particuliers cependant, on en a ajourné la réparation et on a appliqué au câble un système protecteur électrique destiné à prolonger sa durée.

Le câble français de Brest à Saint-Pierre Miquelon de 1879 se trouve dans ce cas. Il a, depuis sa pose, un défaut situé à peu près au milieu de l'Atlantique et dont la réparation entraînerait des dépenses considérables. Bien qu'un courant négatif élargisse, au début, la fissure de l'enveloppe isolante, en agrandissant ainsi la faute, comme il n'exerce aucune action destructive sur le conducteur en cuivre, M. Varley résolut de maintenir la faute en permanence à un potentiel négatif de 3 volts environ. A cet effet il fit relier au câble, en dehors de tous les appareils du poste de Brest, et à travers une résistance de 100 000 ohms, le pôle négatif d'une pile d'environ 50 éléments Minotto, dont le pôle positif fut mis à la terre. Pour régler le nombre exact d'éléments de la pile protectrice, on mesure à Saint-Pierre, à l'aide d'un électromètre, le potentiel de la faute : le résultat en est transmis à Brest. Comme la ligne est séparée par des condensateurs parfaitement isolés des appareils de transmission de Brest et de Saint-Pierre, la pile protectrice n'envoie aucun courant perceptible dans ces appareils et les variations du potentiel qui déterminent la formation des signaux sont les mêmes que si cette pile n'existait pas.

Le câble français de 1869 avait déjà été traité précédemment de cette manière, la faute ayant été maintenue pendant plusieurs années à un potentiel négatif de 40 volts. Lorsque cette section fut relevée, on trouva le cuivre brillant et en parfait état.

Le système de protection qui a été appliqué au câble danois en caoutchouc Hooper, de Calais à Fanœ, paraît moins avantageux. Ce câble, depuis plusieurs années, a un défaut dans l'atterrissement voisin de la côte française : il se trouve, en ce point, enfoui sous des monticules de sable, de telle sorte que le remplacement de la partie défectueuse ne pourrait être effectué qu'au prix du sacrifice d'une assez grande longueur de câble. Pour l'éviter le plus longtemps possible, tout en conservant la transmission par relais avec courants alternés, on donna la prédominance au courant positif, de manière à maintenir oxydée la surface du cuivre à la faute : la pile positive fut portée à 20 éléments Fuller, la pile négative resta composée de 10 éléments. L'oxychlorure de cuivre qui se forme sous l'action du courant positif n'étant pas adhérent au cuivre, tend à se disséminer peu à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peu dans l'eau et à mettre ainsi de nouvelles surfaces de métal en contact avec la mer ; le courant négatif réduit d'un autre côté une partie des dépôts, de telle sorte que la destruction du conducteur, en ce point, doit finir fatalement par se produire.

COURANT DU CABLE ; COURANTS DE POLARISATION ET COURANTS TELLURIQUES

Le cuivre du conducteur, au point où il est en communication avec la mer, et le fer de l'armature n'étant séparés que par une mince couche de liquide, forment un élément de pile à l'intérieur duquel le courant marche du fer au cuivre : aux extrémités du conducteur, ce courant est donc toujours positif sortant du câble. On lui donne le nom de *courant du câble*. Sa force électromotrice ne dépasse pas généralement un volt ; son intensité varie avec la surface de cuivre mise à découvert à la faute, et dans une même faute, avec la quantité des dépôts électrolytiques dus à la pile d'essais ou de transmission et qui recouvrent momentanément une partie plus ou moins grande de cette surface.

Sous l'action du courant positif, les éléments électro-négatifs de l'eau de mer, oxygène, chlore, etc., sont attirés sur le cuivre dont ils brûlent la couche superficielle, en la recouvrant d'une croûte plus résistante au passage de l'électricité ; l'isolement du câble paraît donc augmenter et la perte apparente à la faute diminuer. L'envoi du courant négatif dans le câble succédant au précédent a pour effet de porter sur le cuivre les éléments électro-positifs de l'eau de mer, hydrogène, sodium, etc., qui étaient mis précédemment en liberté sur l'armature en fer ; les matières terreuses existantes sont d'abord réduites ou entraînées mécaniquement par les premières bulles de gaz ; d'où une diminution graduelle mais rapide dans la résistance apparente de la faute. Dans une seconde période, l'hydrogène ne trouvant plus de matière à réduire se dépose à l'état libre à la surface du conducteur et finit par se dégager en bulles, d'où une augmentation d'abord graduelle, puis brusque et considérable de la résistance apparente de la faute ; un régime s'établit ensuite et peut présenter des périodes plus ou moins régulières, suivant la manière dont se fait le dégagement des bulles de gaz. Un nouveau courant positif fait augmenter encore, par le dépôt des sels électrolytiques, la résistance apparente de la faute, et les mêmes phénomènes se reproduisent toujours, dans le même ordre, si l'on alterne les émissions des deux courants de la pile.

Le diagramme n° 343, résumant une série d'expériences faites en 1885 à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'usine de la Seyne par M. Bayol, montre très clairement ces variations. Le câble en expérience avait une résistance de 286 ohms ; le bout du cuivre en avait été dénudé sur une longueur d'un centimètre environ et plongé dans de l'eau de mer.

Les abscisses représentant les temps en minutes et les ordonnées la somme des résistances du conducteur et de la faute, on voit qu'un courant négatif, succédant à un courant positif qui avait fait monter la résistance à 395 ω, fit tomber cette résistance en vingt ou vingt-cinq secondes à 272,5 ω ; le minimum de 271 ω fut atteint en une minute et demie ; durant

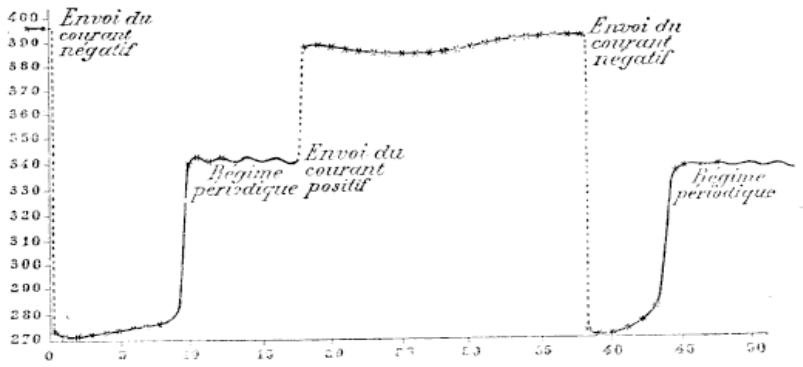


FIG. 343.

les six minutes suivantes, la résistance augmenta graduellement jusqu'à 278 ω, puis brusquement s'éleva à 342 ω, valeur moyenne à laquelle elle se maintint pendant le régime périodique. L'envoi du courant positif fit remonter en moins d'une minute la résistance à 390 ω ; la valeur trouvée primitivement de 396 ω ne fut atteinte qu'au bout d'un quart d'heure et la résistance passa, dans l'intervalle, par un minimum de 385 ω. Un minimum, dû aux courants de polarisation qui se développent lorsque, par le changement de sens du courant de la pile, les dépôts électrolytiques deviennent libres, se produit donc dans chaque cas : celui qui se rapporte aux mesures prises avec le courant négatif est inférieur même à la résistance proprement dite du câble.

Il suit de là que la valeur la plus approchée de la résistance cherchée est celle que l'on obtient en envoyant d'abord dans le câble le courant négatif d'une pile énergique, une centaine d'éléments, par exemple, pendant dix ou douze heures, suivant la recommandation de M. Lumsden, pour nettoyer le bout du conducteur de la vase et des sels qui peuvent le recouvrir. On renverse de temps à autre, pendant quelques minutes, le sens de ce courant, pour éviter tout dépôt de soude : on précipite ainsi de nouveau, à l'état métallique, sur le conducteur une partie du cuivre qui s'était dissous, et on donne au bout une surface rugueuse destinée à faciliter dans la suite le déga-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gement de l'hydrogène. On recouvre ensuite le conducteur, à l'endroit de la faute, d'une couche de chlorure de cuivre, en envoyant dans le câble, pendant une minute environ, le courant positif d'une pile plus faible comprenant deux ou trois éléments par chaque centaine d'ohms de la résistance à mesurer. Enfin, on procède à la mesure par le courant négatif, mais en ayant soin de ne faire que des émissions successives de courants très courtes.

Le courant de polarisation, dû à la décomposition du chlorure de cuivre, fait paraître d'abord la résistance du conducteur inférieure même à sa résistance réelle. Mais, à mesure que la réduction s'opère, la résistance apparente augmente : on a soin de maintenir l'aiguille du galvanomètre au zéro, en débouchant dans la caisse les résistances nécessaires une à une. L'augmentation de résistance est lente et graduelle aussi longtemps qu'il reste du chlorure pour absorber l'hydrogène développé par le courant : on arrête facilement le mouvement de l'aiguille pendant tout ce temps et on peut même en renverser le sens en débouchant deux ou trois ohms de plus dans la caisse. Lorsque la réduction du chlorure est presque terminée, l'augmentation de résistance apparente du câble est un peu plus rapide et l'addition de quelques unités dans la caisse n'a plus aucune influence sur le mouvement de l'aiguille. C'est à cet instant que la résistance débouchée représente à peu près exactement la résistance du câble et de la faute. Immédiatement après, la réduction du chlorure étant complète, l'hydrogène gazeux recouvre toute la surface du métal, produisant ainsi une augmentation de résistance énorme et si brusque qu'il est impossible de la suivre, l'aiguille bondissant pour ainsi dire à sa nouvelle position d'équilibre.

Avec un galvanomètre à miroir, il est très difficile de maintenir l'aiguille au zéro ; mais on reconnaît pratiquement, de la manière suivante, l'instant où le dégagement de l'hydrogène commence : supposons qu'une résistance débouchée, trop faible pour l'équilibre, donne à l'aiguille une déviation à gauche, par exemple ; si la résistance est un peu trop grande, l'aiguille déviera à droite, mais se portera ensuite rapidement à gauche, par suite de l'augmentation de résistance du câble due au dégagement de l'hydrogène. Si, au moment où on abaisse la clef de la pile, l'aiguille ne fait à droite qu'une petite excursion de 5 divisions environ et se porte ensuite à gauche, on se trouve à l'instant critique et la résistance débouchée représente par suite la valeur à peu près exacte de la résistance du câble et de la faute.

En faisant ces essais, il est nécessaire, tout en observant les mouvements de l'aiguille aussitôt après la fermeture du courant de la pile, d'éviter l'effet de la charge électrostatique du câble. La clef du galvanomètre doit donc être abaissée toujours quelques instants après celle de la pile : on s'assure au besoin préalablement du temps nécessaire pour que le courant de charge ne soit plus perceptible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Aux courants de polarisation et du câble viennent s'ajouter encore fréquemment, dans les câbles immergés, les courants telluriques qui sont dus à la différence de potentiel de la terre entre les points que la ligne met en communication. Ces courants varient constamment de sens et d'intensité ; parfois, au milieu d'une période relativement calme, on observe un courant qui s'accroît pendant une heure ou deux, puis décroît et change de sens. D'après les observations faites en 1883 par Blavier sur des lignes aériennes et souterraines, la force électromotrice de ces courants sur une ligne de 350 kilomètres atteindrait souvent 3 et 4 volts. Pendant les orages magnétiques, ces différences de potentiel prennent des valeurs bien plus considérables, et les changements de sens sont plus fréquents : on a observé, durant des aurores boréales, entre des points séparés par une distance de 5 à 600 kilomètres, des différences s'élevant à 7 ou 800 volts. On pourrait donc craindre que sur de longues lignes sous-marines, orientées à peu près de l'est à l'ouest, la différence de potentiel puisse atteindre, à un moment donné, une valeur de 3 à 4000 volts, suffisante pour percer le diélectrique. Heureusement il n'en est pas ainsi, soit que la loi de la proportionnalité de la force électromotrice à la distance ne s'applique pas pour des points très éloignés du globe, soit que la mer qui entoure le câble et qui elle-même doit être parcourue par les mêmes courants agisse par induction, soit enfin que la direction générale de ces courants telluriques soit à peu près celle des côtes des continents [1].

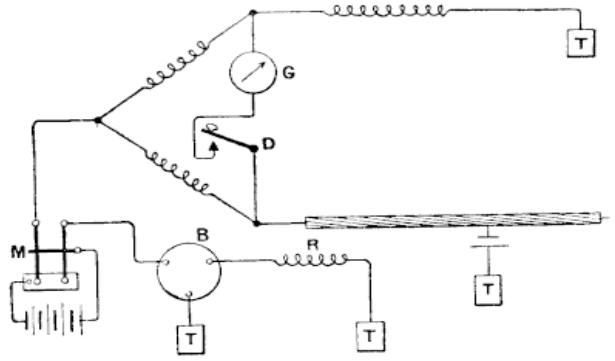


Fig. 344.

Lorsque les courants telluriques sont très variables, on n'a d'autre ressource que d'attendre, pour prendre des mesures, une période plus calme. Lorsqu'ils sont à peu près constants, on peut en éliminer les effets, de même que ceux du courant du câble, en prenant les lectures au *faux zéro* du galvanomètre, c'est-à-dire en considérant provisoirement comme zéro de l'échelle la division à laquelle s'arrête l'index lumineux sous l'influence de ces courants seuls. On lit sans difficulté cette division en abaissant seulement l'interrupteur D (fig. 344) du galvanomètre ; ainsi que nous l'avons montré plus haut (page 364), on peut se dispenser de l'emploi du commuta-

[1] Blavier. *Etudes des courants telluriques*. Paris, 1884.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teur B et de la résistance auxiliaire R. La résistance débouchée dans la troisième branche du pont doit correspondre à peu près à l'équilibre. On vérifie à nouveau le faux zéro, chaque fois, avant de prendre une mesure.

On peut aussi considérer le câble comme une pile dont on cherche la résistance intérieure ; la méthode de Mance (fig. 345) que nous avons exposée plus haut (p. 346) s'applique alors parfaitement.

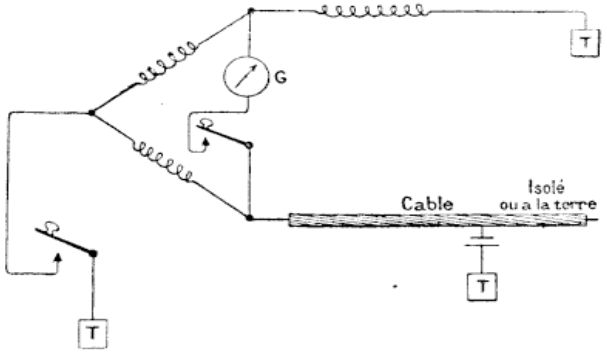


Fig. 345.

On peut enfin, suivant la méthode indiquée par M. Fahie, équilibrer momentanément ces courants par le courant d'une pile et prendre une mesure de la résistance du câble à l'aide d'un pont de Wheatstone, dès que l'on s'aperçoit, à un second galvanomètre disposé spécialement à cet effet (fig. 346), que le câble est à l'état neutre. Ordinairement, il est utile de renverser même légèrement la polarité du courant naturel ; ce courant reprenant ensuite peu à peu le dessus, la polarité contraire décroît successivement, et on est prêt à faire la mesure au moment précis où il ne circule plus aucun courant dans le câble.

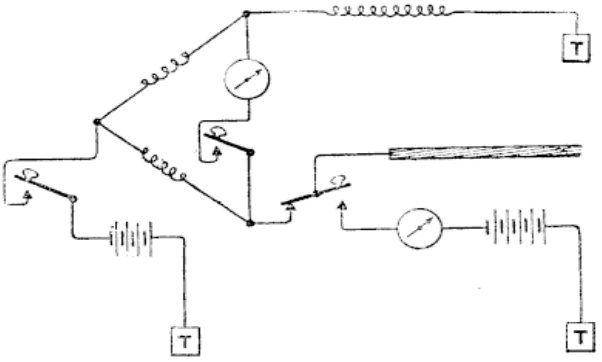


Fig. 346.

Dans bien des cas cependant, les courants telluriques ont une intensité telle que l'équilibre est détruit avant même qu'aucune mesure ait pu être prise. M. Déries, reprenant une idée qui avait été émise précédemment par le docteur Werner Siemens, a proposé de modifier la méthode de M. Fahie, en appliquant directement au câble la pile d'opposition et la réglant à l'aide d'une résistance établie en dérivation sur l'un des éléments, de façon à faire exactement équilibre et au courant du câble et aux courants terrestres (fig. 347).

Les piles employées dans les recherches de défauts des câbles sous-marins doivent être très constantes, bien isolées et de faible résistance intérieure. Des courants énergiques pouvant développer d'autres fautes encore latentes, il convient d'en limiter les éléments au nombre rigoureusement nécessaire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour que la mesure puisse être faite avec précision. Un galvanomètre apériodique est préférable à un galvanomètre astatique dans toutes les méthodes de réduction à zéro ou de mesures de décharge, les lectures devant être prises rapidement et nécessitant le retour de l'aiguille au zéro, dans un temps aussi bref que possible. Une caisse de résistances à curseur de Thomson et Varley permettant de faire varier rapidement le rapport des deux branches de comparaison du pont de Wheastone est, dans bien des cas, indispensable.

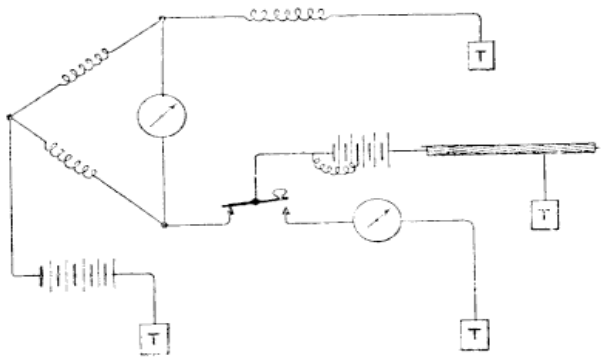


FIG. 347.

Nous supposerons d'abord dans tout ce qui va suivre que le câble n'a qu'une seule faute.

§ 2. — LE CONDUCTEUR EST EN CONTACT AVEC LA MER SANS ÊTRE ROMPU

MÉTHODE DE BLAVIER

Deux cas sont à distinguer, suivant que l'on peut expérimenter simultanément ou non aux deux stations :

1° On mesure à l'une seule des extrémités du câble, A par exemple (fig. 348), les résistances R_1 et r_1 du câble isolé et mis successivement à la terre à l'autre extrémité B. Lorsque l'état de la faute rend impossible l'échange des communications, on convient à l'avance d'heures déterminées auxquelles ces opérations seront faites. Si x et y désignent les résistances des deux parties A C, B C de la ligne, z celle de la faute, r celle de la ligne totale A B mesurée lorsqu'elle était en bon état, on aura

$$x + y = r$$
$$x + z = R_1$$
$$x + \frac{z\,y}{z + y} = r_1$$

d'où

$$y = r - r_1 + \sqrt{(R_1 - r_1)\,(r - r_1)} \text{ ohms}$$

en ne prenant que le signe + devant le radical, y étant essentiellement positif,

$$x = r_1 - \sqrt{(R_1 - r_1)\,(r - r_1)} \text{ ohms}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et

$$z = R_1 - r_1 + \sqrt{(R_1 - r_1)(r - r_1)} \text{ ohms}$$

Divisant x et y par le nombre qui exprime la résistance moyenne de la ligne par mille marin, on a les distances en milles de la faute aux deux stations A et B.

2° Lorsque l'on peut faire des mesures simultanément aux deux extrémités

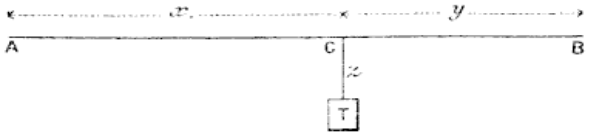


FIG. 348.

de la ligne, en désignant par r_2 et R_2 les valeurs des résistances obtenues en B, avec le câble à la terre ou isolé en A, on a cinq équations

$$x + z = R_1 \qquad y + z = R_2$$

$$x + \frac{z\,y}{z + y} = r_1 \qquad y + \frac{z\,x}{z + x} = r_2$$

$$x + y = r$$

qu'on peut combiner par groupes de 3 de diverses façons, de manière à en tirer des valeurs des inconnues se contrôlant les unes les autres. On obtient ainsi

$$x = \frac{r + R_1 - R_2}{2} \qquad x = \sqrt{R_1 (r - r_2)}$$

$$x = \frac{r_1 (r - r_2)}{r_1 - r_2} \left(1 - \sqrt{\frac{r_2 (r - r_1)}{r_1 (r - r_2)}}\right)$$

La mesure des résistances r_1, r_2, R_1 et R_2 doit se faire par le pont de Wheatstone et à des intervalles assez rapprochés pour que la résistance de la faute ne puisse pas varier pendant ce temps d'une façon appréciable ; la caisse de résistances à curseur de Thomson et Varley donne, dans ce cas, des facilités précieuses pour effectuer rapidement les mesures. On peut obtenir ainsi des résultats très précis, lorsque la longueur du câble ne dépasse pas 500 milles marins, que son isolement est assez élevé et que la résistance de la faute est inférieure à une centaine d'ohms. On annule l'effet des courants étrangers, lorsqu'ils sont faibles, soit en prenant un faux zéro, soit en employant la méthode de Fahie.

MÉTHODE D'ANDERSON ET KENNELLY

Les résultats obtenus par la méthode de Blavier étant souvent altérés, dans une proportion considérable, par la polarisation de la faute, on peut, suivant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le procédé indiqué par MM. Anderson et Kennelly, faire usage de cette méthode seulement pour calculer la valeur de la résistance ρ qui doit être

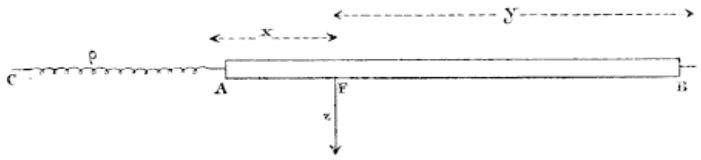


FIG. 349.

placée à l'extrémité A du câble A B (fig. 349), la plus voisine de la faute F, de telle sorte que celle-ci paraisse au milieu de la résistance C B. On a alors

$$\rho + x = y$$

D'un autre côté, si r représente la résistance du conducteur A B, lorsque le câble est en bon état,

$$x + y = r$$

D'où

$$x = \frac{r - \rho}{2}$$

Pour déterminer la valeur de ρ, remarquons que si l'on mesure la résistance de la ligne C B successivement à chacune de ses deux extrémités, en mettant à la terre l'extrémité opposée, les résultats obtenus de part et d'autre devront être égaux. Par conséquent

$$\left(\rho + x + \frac{y\,z}{y + z}\right) - \left(y + \frac{z\,(\rho + x)}{\rho + x + z}\right) = 0$$

Différentiant par rapport à ρ le premier membre de cette dernière équation que nous désignerons, pour abréger, par u, il viendra

$$\frac{\Delta u}{\Delta \rho} = 1 - \left(\frac{z}{\rho + x + z}\right)^2 = \frac{y + \dfrac{y\,z}{y + z}}{y + z}$$

Si donc Δu représente la différence des mesures prises en A et en B avec une valeur approximative seulement de ρ, la correction Δ_ρ sera donnée sensiblement par la relation

$$\Delta \rho = \frac{\Delta u\,(y + z)}{y + \dfrac{y\,z}{y + z}}$$

EXEMPLE[1]

On a un câble d'une résistance totale $R = 1\,142^\omega$ avant l'apparition de la faute ; par la méthode de Blavier, on trouve approximativement $y = 1\,000^\omega$ et $z = 40\,000^\omega$.

[1] *Journal of the Society of teleyraph Engineers and Electricians*, vol. XVI, p. 582.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En prenant $\rho = 1\,300^{\omega}$, le poste A obtient

$$\rho + x + \frac{y\,z}{y+z} = 2380^{\omega}$$

pour une moyenne de 4 essais faits alternativement avec le courant positif et le courant négatif d'une pile de 30 éléments Leclanché. Le poste B obtient de son côté

$$y + \frac{z\,(\rho + x)}{z + \rho + x} = 2421^{\omega},25$$

ses essais se croisant avec ceux du poste A. On en conclut

$$\Delta u = -\,41^{\omega},25$$

et

$$\Delta\rho = -\,\frac{41,25 \times 41000}{1000 + 976} = -\,855^{\omega}$$

et enfin

$$\rho = 1300 - 855 = 445^{\omega}$$

En recommençant les essais avec $\rho = 500^{\omega}$, les moyennes de 4 expériences faites par les deux postes A et B sont, pour le premier $1\,627_{\omega}$, pour le second $1\,625^{\omega},6$. Donc

$$x = \frac{1142 - 500}{2} = 321^{\omega}$$

La faute fut trouvée effectivement à une distance de 246^{ω} 6 ; l'erreur de mesure fut en conséquence de $74^{\omega},4$.

MÉTHODE DE CLARK

Le câble est relié à travers une résistance r à une pile dont l'autre pôle est à la terre ; l'extrémité éloignée du câble est isolée. On mesure (fig. 350) les potentiels V_1, V_2 et v de chaque côté de la résistance r et en C ; ce dernier, si le câble est bien isolé, sera égal au potentiel de la faute. Donc

$$\frac{V_1 - V_2}{r} = \frac{V_2 - v}{x}$$

d'où

$$x = r\,\frac{V_2 - v}{V_1 - V_2}$$

Les potentiels sont mesurés soit à l'électromètre, soit, comme ils n'entrent dans la valeur de x que par le rapport de leurs différences, au galvanomètre. On décharge successivement et rapidement les charges accumulées aux points A, B et C, dans un même condensateur, ou bien, ce qui est préférable, on compare les potentiels v, V_1 et V_2, suivant la méthode, indiquée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

page 357, à la force électromotrice d'un élément de pile tel que celui de M. Latimer Clark, dont on peut ob tenir deux échantillons bien uniformes dans les deux stations.

Des erreurs, même très faibles dans la mesure de V, et de V_2, pouvant produire des erreurs graves dans la valeur de x, si la différence $V_1 - V$ qui figure en dénominateur est petite, il est nécessaire de se placer toujours, pour l'exécution de cet essai, dans les conditions les plus favorables. On les réalise en prenant approximativement $r = x$ lorsqu'on se sert d'un galvanomètre et $r = 2\,x$ lorsqu'on fait usage de l'électromètre et que l'on mesure directement la différence

$$V_1 - V_2$$

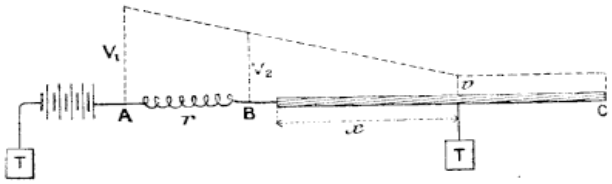


FIG. 350.

On peut aussi ne mesurer que les deux potentiels V_2 et v, à la condition de prendre la résistance r_1 du câble B T, du point B jusques et y compris celle de la faute.

On a alors

$$x = r_1 \frac{V_2 - v}{V_2}$$

Cette méthode donne de très bons résultats sur de très longs câbles, lorsque la faute est rapprochée de l'une des extrémités.

MÉTHODE DE LACOINE

Cette méthode, un peu compliquée en apparence, nécessite six rhéostats, quatre galvanomètres et deux expérimentateurs avec deux aides opérant *simultanément* aux deux extrémités de la ligne. Elle a l'avantage d'être indépendante de la polarisation au point défectueux et des variations qui peuvent se produire dans les forces électromotrices ou dans les résistances des piles employées ; elle n'exige en outre aucune donnée électrique fournie par des essais antérieurs et, par suite, aucune supposition sur la température actuelle du câble.

Les appareils et les communications sont disposés comme l'indique la figure 351 dans laquelle

A B représente le câble et C la position du point défectueux ;

R, R′ et ρ, R_1, R'_1 et ρ_1 sont des caisses de résistances. R, R_1, R′ et R'_1 de-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vant pouvoir varier d'une manière continue, il est préférable de les choisir sous forme de caisses à curseur ; les deux premières peuvent avoir une graduation quelconque ou même n'être pas graduées du tout ;

G, g, G_1 et g_1 sont des galvanomètres à miroir,

E, E_1, e, e_1, e' et e'_1 des piles. Les quatre dernières, formées chacune d'un élément étalon de Latimer Clark, sont par suite égales entre elles. E et E_1 sont composées d'éléments d'un type quelconque, pourvu que leur force électro-

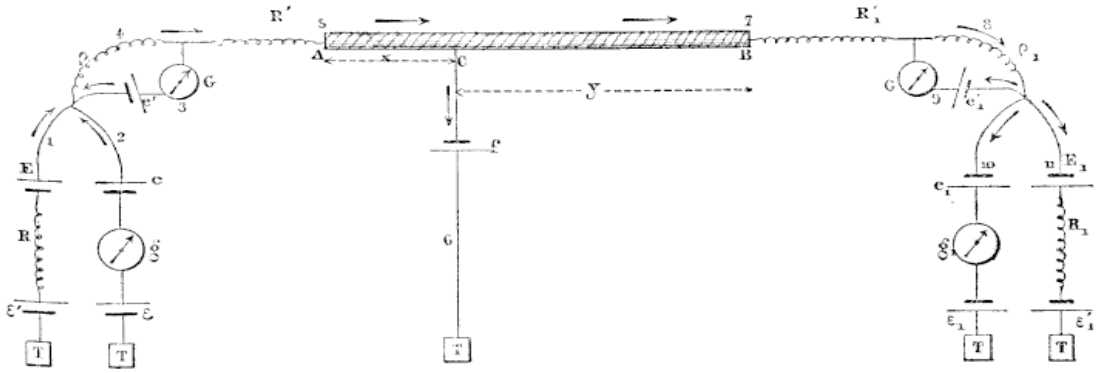


FIG. 351.

motrice totale soit supérieure à celle d'un élément L. Clark ; elles produisent seules un courant et du travail pendant l'essai. Ces différentes piles sont orientées de telle sorte que les courants de E et E_1 s'ajoutent dans le câble, mais sont de sens contraire à ceux que tendent à développer les 4 éléments étalons e, e', e_1 et e'_1.

Enfin ε, ε', ε_1, ε'_1 et f représentent les forces électromotrices naturelles qui peuvent exister et agir sur le câble.

Une même valeur convenue à l'avance pour l'essai étant donnée à ρ et ρ_1, à l'instant spécifié les deux aides tournent lentement, à droite ou à gauche, les manivelles des rhéostats R et R_1, de manière à amener d'abord et à maintenir ensuite au zéro les galvanomètres g et g_1.

Les deux expérimentateurs agissent à ce moment sur les manivelles des rhéostats R' et R'_1 de façon à amener également au zéro l'un le galvanomètre G, l'autre le galvanomètre G_1. Chacun d'eux a d'ailleurs la certitude que ce résultat est atteint par son correspondant lorsqu'il voit son propre instrument se maintenir au zéro pendant quelques instants sans qu'il ait besoin de toucher au rhéostat.

Immédiatement après, chaque expérimentateur change ρ en 2ρ, ce qui fait dévier G et G_1. On les ramène au zéro en modifiant les résistances R' et R'_1 : soient R' et R'', R'_1 et R''_1 les valeurs respectives de ces résistances correspondant à l'équilibre dans les deux cas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On répète plusieurs fois les mêmes opérations et on en prend les moyennes : un calcul facile donne ensuite la distance de la faute.

Si nous désignons en effet par i_1, i_2,..... les intensités des courants qui circulent dans les diverses branches et par r_1, r_2,..... les résistances correspondantes, les lois de Kirchhoff donneront les relations

$$\begin{gathered} i_1 + i_2 + i_3 = i_4 \\ i_3 + i_5 = i_4 \\ i_6 + i_7 = i_5 \\ i_7 + i_9 = i_8 \\ i_9 + i_{10} + i_{11} = i_8 \\ i_2 r_2 + i_4 r_4 + i_5 r_5 + i_6 r_6 = \varepsilon + e + f \qquad (1) \\ i_3 r_3 + i_4 r_4 = e' \\ - i_6 r_6 + i_7 r_7 + i_8 r_8 + i_{10} r_{10} = - f + e_1 + \varepsilon_1 \qquad (2) \\ i_8 r_8 + i_9 r_9 = e'_1 \end{gathered}$$

Puisque

$$i_2 = i_3 = i_9 = i_{10} = 0$$

on en conclut

$$i_1 = i_4 = i_5$$

et

$$i_7 = i_8 = i_{11}$$

D'ailleurs, comme $e' = e'$ et $r_4 = r_8 = \rho$, on a

$$i_4 = i_8$$

Par suite

$$i_1 = i_4 = i_5 = i_7 = i_8 = i_{11} = \mathrm{I}$$

et

$$i_6 = 0$$

Le courant étant nul dans la branche 6, la faute ne peut se polariser.

Transportant les valeurs ci-dessus dans les équations (1) et (2), il vient

$$\mathrm{I} = \frac{\varepsilon + e + f}{\rho + r_5} \qquad \text{et} \qquad \mathrm{I} = \frac{- f + e_1 + \varepsilon_1}{\rho + r_7}$$

Les quatre galvanomètres étant maintenus au zéro, après le changement de ρ en $2\,\rho$ effectué simultanément dans les deux postes, le courant circulant I est réduit à la moitié de sa valeur. On a donc

$$\frac{\mathrm{I}}{2} = \frac{\varepsilon + e + f}{2\,\rho + r'_5} \qquad \text{et} \qquad \frac{\mathrm{I}}{2} = \frac{- f + e_1 + \varepsilon_1}{2\,\rho + r'_7}$$

si l'on a opéré assez rapidement pour qu'aucune variation n'ait pu se produire dans les forces électromotrices naturelles. On tire alors des quatre dernières relations

$$r'_5 = 2\,r_5$$

et

$$r'_7 = 2\,r_7$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais x et y désignant les résistances des deux parties du câble comprises entre la faute C et les extrémités A et B, on a

$$r_3 = R' + x \qquad r_2 = R'_1 + y$$
$$r'_3 = R'' + x \qquad r'_2 = R''_1 + y$$

Par suite

$$x = R'' - 2R'$$

et

$$y = R''_1 - 2R'_1$$

Si l est la longueur connue du câble et d la distance de la faute à l'extrémité A, on a

$$\frac{l-d}{d} = \frac{y}{x}$$

et

$$d = l\,\frac{R'' - 2R'}{R'' + R''_1 - 2(R' + R'_1)}$$

La résistance de la faute, si l'on désire la connaître, peut se déterminer facilement en mesurant la résistance A C T de la ligne isolée à l'extrémité opposée B et en en retranchant celle de la partie A C.

MÉTHODES DE SIEMENS

1° A la station A (fig. 352), on met le câble en communication avec une pile dont le potentiel est V_1; soit v le potentiel produit à la faute C et par con-

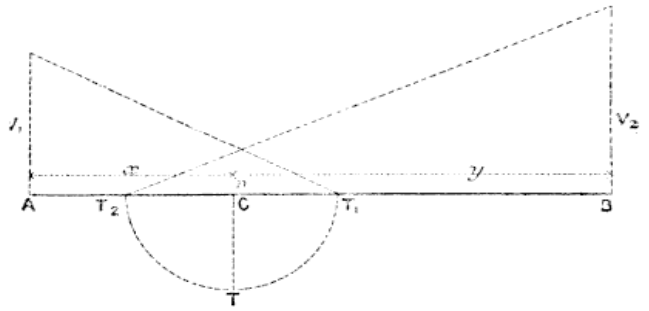


FIG. 352.

séquent à l'extrémité isolée B du câble. On fait la même expérience en B en choisissant la force électromotrice V_2 de la seconde pile, de telle sorte que le potentiel à la faute, A étant isolé, soit encore égal à v. Comme

$$CT_1 = CT_2 = CT$$

on a

$$\frac{x}{y} = \frac{V_1 - v}{V_2 - v}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'ailleurs

$$x + y = r$$

r désignant la résistance du cuivre de toute la ligne. Par suite

$$x = r\,\frac{V_1 - v}{V_1 + V_2 - 2v}$$

Cette méthode réussit mieux sur les longs câbles, lorsque la faute est dans le voisinage du milieu de la longueur, les opérations étant moins troublées alors par la faute résultante. Les mesures doivent être prises, dans les deux stations, à un intervalle aussi rapproché que possible, et les instruments comparés entre eux à l'aide d'un élément de pile étalon. On établit une déri-

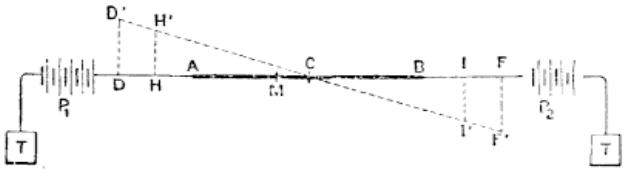


Fig. 353.

vation sur la pile ou sur une partie de la pile en B, de manière à donner à V_2 exactement la valeur qui lui convient. On emploie d'ailleurs des piles énergiques pour avoir des déviations suffisamment grandes.

2° Si aux deux extrémités A et B d'un câble homogène A B (fig. 353) et d'un isolement uniforme, on attache deux résistances égales A D, B F, reliées à deux piles P_1, P_2 égales, opposées par leur pôles de noms contraires et en communication avec la terre par leurs pôles libres, la ligne représentant la chute des potentiels dans le circuit coupera le câble au milieu C de sa longueur. Le potentiel de ce point étant nul, le courant d'aucune des deux piles ne pourrait traverser une faute qui s'y produirait pour se rendre à la terre, et les potentiels, en tous les points du circuit, conserveraient leur valeur. Si une faute se déclare en un point M, situé dans la moitié A C du câble, il suffira, pour y faire passer la ligne des potentiels, d'augmenter A D et de diminuer B F de telle sorte que

$$\text{Rés. AM} + \text{rés. AD} = \text{rés. MB} + \text{rés. BF} = \text{rés.}\,\frac{\text{DF}}{2}$$

La quantité dont A D aura été augmenté, égale à celle dont B F aura été diminué, sera égale à M C, ou à la résistance de la section du câble comprise entre la faute et le milieu de la ligne. Chacune des résistances A D et B F étant composée de deux parties, l'une D H, I F fixe, l'autre A H, I B variable, on mesure périodiquement à chaque station A et B, tandis que le câble est en bon état, la différence de potentiel

$$DD' - HH' = FF' - II'$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le jour où un défaut devient apparent, on n'a, pour le localiser, qu'à faire varier A H et B I, de telle sorte que les différences de potentiel aux extrémités des résistances fixes D H et I F reprennent leur valeur antérieure.

MÉTHODE D'AYRTON ET PERRY

Lorsque l'on peut expérimenter *simultanément* aux deux extrémités de la ligne, soit que l'on opère à des heures exactement convenues à l'avance, soit

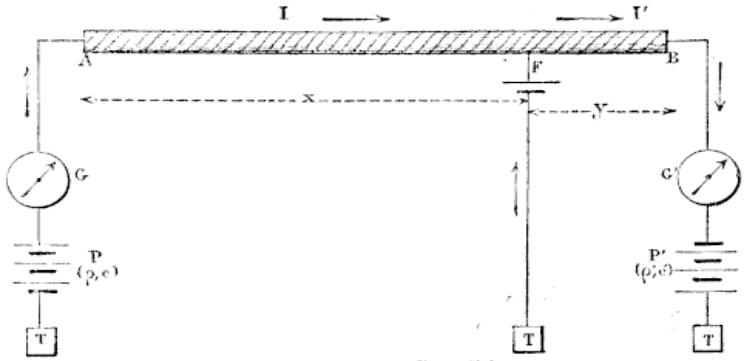


Fig. 354.

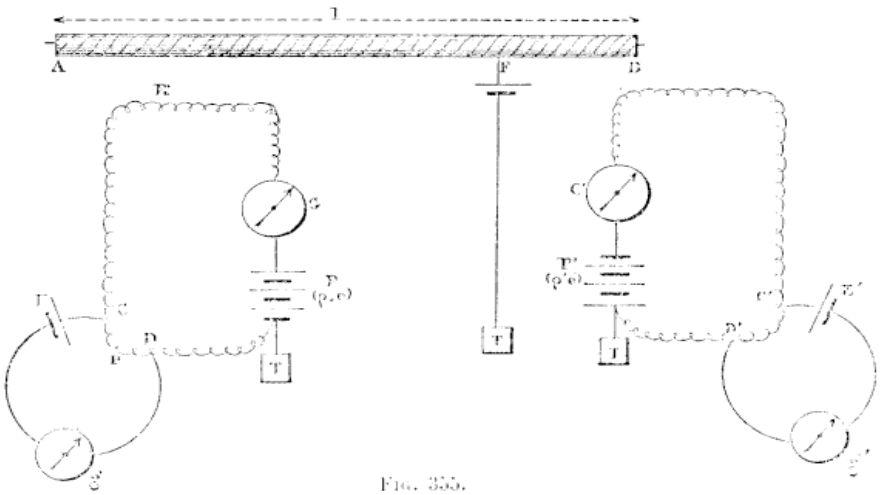


Fig. 355.

que l'on ait la possibilité d'échanger quelques signaux par un second câble en trop mauvais état toutefois pour permettre l'essai de la boucle, la méthode de MM. Ayrton et Perry donne un moyen de déterminer avec précision la position d'une perte partielle à la terre, sans que les résultats soient altérés par les variations de résistance de la faute ou par la présence d'une force électromotrice dans la faute même.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On réunit en un circuit le câble avec deux galvanomètres à miroir G et G′ (fig. 354) et deux piles P et P′ disposées de manière à envoyer dans le câble des courants de même sens : la faute n'étant traversée ainsi que par un courant très faible, ne se polarise que très lentement et les variations qui peuvent se produire dans sa résistance se font également avec lenteur.

A l'instant convenu ou indiqué par un signal, on observe la déviation de l'aiguille à chaque galvanomètre. On peut aussi ramener les aiguilles au zéro en agissant sur les aimants directeurs des deux instruments : mais on doit avoir soin alors de ne plus toucher ces aimants à partir de l'instant précis marqué par le signal. Cette dernière manière d'opérer est même préférable, en ce qu'elle maintient les aiguilles dans leur position du maximum de sensibilité.

On détache le câble des deux galvanomètres et on le remplace par des résistances R et R′ (fig. 355) que l'on ajuste de manière soit à reproduire exactement les déviations obtenues précédemment, soit à ramener les aiguilles au zéro, les aimants directeurs conservant les positions qu'ils occupaient au moment de l'envoi du signal.

On relie ensuite, dans chaque poste, un élément étalon de Latimer Clark et un galvanomètre ordinaire à deux points c et D, c′ et D′ des résistances R et R′ ; les résistances r et r' qui séparent ces points sont choisies de telle sorte que les branches contenant les galvanomètres g et g' ne soient parcourues par aucun courant. La force électromotrice des éléments L. Clark s'affaiblissant très rapidement, dès que leur circuit est fermé, il convient de ne pas multiplier sans nécessité les émissions de courant durant cette dernière expérience.

Si l'on désigne maintenant par

l la résistance du conducteur lorsque le câble est en bon état,

x et y les résistances des deux sections comprises entre la faute et les extrémités A et B,

e et e' les forces électromotrices des deux piles P et P′,

p et p' leurs résistances intérieures,

G et G′ les résistances des deux galvanomètres à miroir,

I et I′ les intensités des courants qui circulent dans les deux parties de la ligne,

on aura, en appliquant au circuit G A F B G′ la seconde loi de Kirchhoff,

$$I\,(p + G + x) + I'\,(y + G' + p') = e + e'$$

D'autre part, E désignant la force électromotrice d'un élément étalon de L. Clark, on a dans les circuits fermés C D G R, C′ D′ G′ R′

$$I = \frac{e}{R + G + p} \qquad I' = \frac{e'}{R' + G' + p'}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et enfin dans les circuits C D y E, C' D' y' E

$$\mathrm{I}r = \mathrm{E} \qquad \mathrm{I}'r' = \mathrm{E}$$

Eliminant I, I', e, e' et E entre ces cinq équations, il reste

$$\frac{x - \mathrm{R}}{r} = \frac{\mathrm{R}' - y}{r'}$$

et comme

$$y = l - x$$

il vient

$$x = \frac{r'\mathrm{R} + r(\mathrm{R}' - l)}{r' - r}$$

MÉTHODE DE JENKIN

Cette méthode ne s'applique qu'à des fautes d'une grande résistance et exige la mesure simultanée d'un potentiel à chaque extrémité de la ligne et

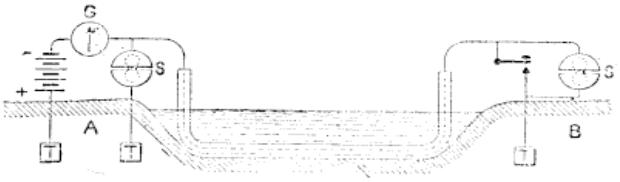


Fig. 356.

de l'intensité d'un courant à l'une d'elles : elle nécessite conséquemment l'emploi d'un galvanomètre à miroir et de deux électromètres. Elle suppose connues la résistance p du conducteur par unité de longueur, celle R de l'enveloppe isolante prise dans une direction perpendiculaire à l'axe du câble, également par unité de longueur, enfin la longueur l du câble. Toutes les mesures doivent se rapporter à un même système absolu d'unités, le système centimètre-gramme-seconde, par exemple.

A l'une des stations A, le câble est relié (fig. 356) à un électromètre S et, à travers le galvanomètre G, au pôle négatif d'une pile dont le pôle positif est à la terre. A l'autre station B, le câble est simplement en communication avec le second électromètre et se trouve par suite isolé.

Soient

V le potentiel de la ligne mesuré à l'électromètre en A,

V_1 le potentiel de la ligne mesuré à l'électromètre en B,

I l'intensité en A du courant mesurée au galvanomètre,

v le potentiel de la ligne en un point situé à la distance x de A,

i l'intensité du courant en ce point,

u le potentiel au point de la ligne où se trouve la faute,

λ la distance de la faute à l'origine A.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsque l'état permanent est établi, on a l'équation différentielle connue

$$\frac{d^2v}{dx^2} - \frac{2}{R} v = 0$$

ou, en posant

$$\frac{2}{R} = a^2 \qquad (1)$$

$$\frac{d^2v}{dx^2} - a^2 v = 0$$

dont l'intégrale est

$$v = C e^{ax} + C' e^{-ax} \qquad (2)$$

C et C' désignant deux constantes. Pour avoir la courbe des potentiels entre l'origine A et la faute, remarquons que pour $x = o$, $v = V$; par suite

$$V = C + C' \qquad (3)$$

De même pour $x = \lambda$, $v = u$; donc

$$u = C e^{a\lambda} + C' e^{-a\lambda} \qquad (4)$$

Tirant C et C' de (3) et de (4) et substituant dans (2), il vient

$$v = \frac{1}{e^{-a\lambda} - e^{a\lambda}} \left[e^{ax} \left(V e^{-a\lambda} - u \right) + e^{-ax} \left(u - V e^{a\lambda} \right) \right]$$

D'après la loi d'Ohm

$$\rho i = - \frac{dv}{dx}$$

donc

$$\rho i = \frac{a}{e^{a\lambda} - e^{-a\lambda}} \left[e^{ax} \left(V e^{-a\lambda} - u \right) - e^{-ax} \left(u - V e^{a\lambda} \right) \right]$$

A l'origine pour

$$x = 0 \qquad i = I$$

$$\rho I = \frac{a}{e^{a\lambda} - e^{-a\lambda}} \left[V \left(e^{a\lambda} + e^{-a\lambda} \right) - 2u \right] \qquad (5)$$

Pour avoir la courbe des potentiels entre la faute et l'extrémité isolée B du câble, les constantes de l'équation (2) seront déterminées par les conditions

$$x = \lambda \qquad v = u$$

et

$$x = l \qquad v = V_1$$

qui donnent en désignant par C_1 et C_1' les valeurs des nouvelles constantes,

$$u = C_1 e^{a\lambda} + C_1' e^{-a\lambda}$$

$$V_1 = C_1 e^{al} + C_1' e^{-al}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si l'on tire de ces deux équations les valeurs de C_1 et de C_1' et qu'on les susbtitue dans (2), il vient

$$v = \frac{1}{e^{a(l-\lambda)} - e^{-a(l-\lambda)}} \left[e^{ax} \left(V_1 e^{-a\lambda} - u e^{-al} \right) + e^{-ax} \left(u e^{al} - V_1 e^{a\lambda} \right) \right]$$

D'ailleurs

$$-\frac{dv}{dx} = \rho i$$

ou

$$\rho i = \frac{a}{e^{a(l-\lambda)} - e^{-a(l-\lambda)}} \left[e^{ax} \left(V_1 e^{-a\lambda} - u e^{-al} \right) - e^{-ax} \left(u e^{al} - V_1 e^{a\lambda} \right) \right]$$

Comme pour

$$x = l \qquad i = o$$

$$e^{al} \left(V_1 e^{-a\lambda} - u e^{-al} \right) - e^{-al} \left(u e^{al} - V_1 e^{a\lambda} \right) = 0$$

d'où

$$2u = V_1 \left(e^{a(l-\lambda)} + e^{-a(l-\lambda)} \right)$$

Substituant cette valeur de u dans (5) et réduisant, il vient

$$e^{2a\lambda} \left(V_1 e^{-al} + \frac{\rho}{a} I - V \right) = V + \frac{\rho}{a} I - V_1 e^{al} \qquad (6)$$

Si nous posons

$$V_1 e^{-al} + \frac{\rho}{a} I - V = D$$

$$V + \frac{\rho}{a} I - V_1 e^{al} = F$$

l'équation (6) ci-dessus deviendra

$$e^{2a\lambda} = \frac{F}{D}$$

d'où

$$\lambda = 2a \log_e \frac{F}{D}$$

$\log_e$ représentant des logarithmes népériens.

CORRECTIONS DE HOCKIN

Lorsque les câbles sont très longs ou que leur isolement est médiocre, la mesure de la résistance du cuivre, avant même l'apparition d'une faute, ne donne pas la vraie valeur de la résistance r du conducteur. Un isolement défectueux agit en effet comme une faute dont la résistance est égale à la résistance d'isolement totale du câble et dont la position dépend de l'isolement partiel des diverses sections de la ligne. M. Schwendler lui a donné le nom de *faute résultante*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour déduire r de la résistance *apparente* r' du conducteur et de l'isolement total R' du câble, mesurés lorsque la ligne était en bon état, désignons par u la résistance apparente de la partie B C du câble (fig. 357) comprise

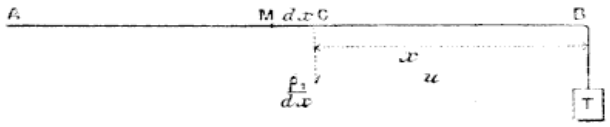


FIG. 357.

entre l'extrémité éloignée B qui se trouve à la terre et un point C situé à la distance x de B, par ρ la résistance du cuivre seul par unité de longueur et par ρ_1 celle du diélectrique, également par unité de longueur. La résistance du conducteur de l'élément M C $= dx$ de câble sera $\rho\, dx$, son isolement $\frac{\rho_1}{dx}$ et on aura

$$u + du = \frac{u \times \frac{\rho_1}{dx}}{u + \frac{\rho_1}{dx}} + \rho\, dx = u\left(1 - \frac{u\, dx}{\rho_1}\right) + \rho\, dx$$

en négligeant les infiniment petits d'un ordre plus élevé que le premier. On tire de là

$$du = \rho\, dx - \frac{u^2}{\rho_1}\, dx \qquad (1)$$

Si l'on prend comme première approximation $u = \rho\, x$, d'où $dx = \frac{du}{\rho}$, l'équation précédente devient

$$du = \rho dx - \frac{1}{\rho\ \rho_1}\, u^2\, du$$

Intégrant entre les limites o et l pour x, l représentant la longueur du câble A B, et entre les valeurs correspondantes o et r' pour u, il vient

$$r' = \rho\, l - \frac{r'^3}{3\ \rho\ \rho_1}$$

Mais $\rho\, l = r$ et $\frac{\rho_1}{l} = \mathrm{R}'$, en désignant par R' l'isolement total du câble A B ; donc,

$$r = r' + \frac{r'^3}{3\, r\, \mathrm{R}'}$$

Remplaçant dans le terme de correction r par r', on a *approximativement*

$$r = r'\left(1 + \frac{1}{3}\frac{r'}{\mathrm{R}'}\right)$$

On peut, par un calcul analogue, déduire l'isolement vrai R de l'isolement apparent R' et de la résistance apparente r' du cuivre. Reprenons l'équation (1) ci-dessus qui est encore applicable, mais dans laquelle, u étant main-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tenant comparable à ρ_1, le terme $-\frac{u^2}{\rho_1}dx$ l'emporte de beaucoup sur $\rho\,dx$. Nous l'écrirons en conséquence

$$du = -\frac{u^2}{\rho_1}dx + \rho\,dx \qquad (2)$$

Comme première approximation, nous pourrons prendre

$$du = -\frac{u^2}{\rho_1}dx$$

d'où

$$dx = -\frac{\rho_1}{u^2}du$$

et en substituant cette valeur dans (2) nous aurons

$$du = -\frac{u^2}{\rho_1}dx - \frac{\rho\,\rho_1}{u^2}du$$

Intégrant entre les limites o et l pour x, entre ∞ et R′ pour u, il vient

$$\int_{\infty}^{R'}\left(\frac{1}{u^2}+\frac{\rho\,\rho_1}{u^4}\right)du = -\frac{l}{\rho_1}$$

$$\frac{1}{R'}+\frac{\rho\,\rho_1}{3\,R'^3} = \frac{l}{\rho_1}$$

d'où

$$R' = \frac{\rho_1}{l}\left(1+\frac{\frac{\rho_1}{l}\,\rho\,l}{3\,R'^2}\right)$$

Mais $\frac{\rho_1}{l} = R$ et $\rho\,l = r$. Remplaçant dans le terme de correction R par R′ et r par r', on a *approximativement*

$$R' = R\left(1+\frac{r'}{3\,R}\right)$$

d'où et en négligeant les termes qui contiennent $\frac{r'}{3R}$ à une puissance supérieure à la première

$$R = R'\left(1-\frac{r'}{3\,R'}\right)$$

Les deux démonstrations qui précèdent nous ont été communiquées par M. Vaschy. Les formules complètes données par Hockin [1] sont

$$r = r'\left[1+\frac{1}{3}\frac{r'}{R'}+\frac{1}{5}\left(\frac{r'}{R'}\right)^2+\frac{1}{7}\left(\frac{r'}{R'}\right)^3+\cdots\right]$$

$$R = R'\left[1-\frac{1}{3}\frac{r'}{R'}-\frac{4}{45}\left(\frac{r'}{R'}\right)^2-\frac{44}{945}\left(\frac{r'}{R'}\right)^3-\frac{428}{14175}\left(\frac{r'}{R'}\right)^4-\cdots\right]$$

Sous cette dernière forme, les formules de correction sont applicables aux cas où la résistance d'isolement apparente ne représente que deux ou trois fois celle du conducteur.

[1] *Journal of the Society of telegraph Engineers*, année 1876, vol. V, p. 427.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans ces formules, r' et R' doivent être exprimés tous deux en fonction de la même unité, ohm ou megohm.

ESSAIS PAR LA BOUCLE

Lorsque l'on dispose pour les essais d'un second câble aboutissant aux mêmes points d'atterrissement que le câble fautif, on peut, en réunissant les extrémités éloignées des deux câbles, obtenir des mesures indépendantes, dans de certaines limites, de la résistance de la faute. Ces mesures étant encore à peu près correctes, lors même que la faute n'est pas parfaitement nettoyée ou complètement dépolarisée, on ne doit jamais hésiter à y recourir lorsqu'il est possible de le faire. Ces méthodes d'essais s'appliquent également à un câble unique à plusieurs conducteurs, lorsqu'il y reste au moins un fil en bon état, et aux câbles à un seul conducteur lovés dans les cuves d'une usine ou d'un navire.

Méthode de Murray.

Les deux câbles A B, C B (fig. 358), bouclés à la station éloignée B, forment les troisième et quatrième branches d'un pont de Wheatstone dans

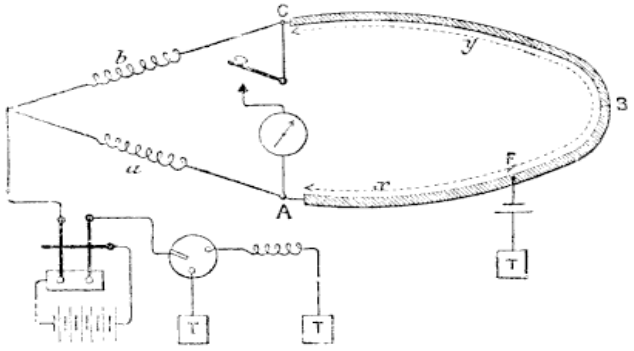


Fig. 358.

lequel la diagonale qui contient la pile est complétée par la terre et la faute F. On fait varier les résistances des branches de comparaison de manière à obtenir l'équilibre.

Si l'on désigne par x la résistance de la partie A F, par y celle de la partie F B C, par a et b les résistances des deux premières branches du pont correspondant à l'équilibre, par r_1 et r_2 celles des deux câbles A B et B C en bon état et connues par des mesures antérieures, on a

$$x + y = r_1 + r_2 \qquad \frac{x}{y} = \frac{a}{b}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'où $$x = \frac{a}{a+b}\left(r_1 + r_2\right)$$

Dans la pratique, on a soin d'éliminer les effets des courants du câble et de la polarisation de la faute : 1° en déterminant avant chaque mesure le faux zéro sur lequel on établit ensuite l'équilibre ; 2° en envoyant dans le câble, pour chaque essai, un courant positif de quelque durée suivi d'un courant négatif plus court durant lequel on cherche à conserver la balance dans le pont. Les valeurs de a et de b, qui donnent l'équilibre à l'instant où la résistance de la faute est minimum, sont les plus exactes. On intervertit alors les extrémités A et B des câbles bouclés et on prend la moyenne des résultats obtenus.

Pour se placer dans les conditions les plus favorables, on prend b aussi grand que le permettent les instruments dont on dispose (une caisse de résistances à curseur de Thomson et Varley est extrêmement commode), et on choisit un galvanomètre dont la résistance ne soit pas supérieure à 5 fois celle des câbles réunis. L'essai réussit mieux lorsqu'il est fait à l'extrémité éloignée de la faute qu'à l'extrémité rapprochée, la faute F se trouvant alors le plus près possible du milieu B de la boucle.

Lorsque les câbles bouclés sont très courts, on obtient de meilleurs résultats en intervertissant les positions de la pile et du galvanomètre.

Méthode de Varley.

On forme un pont de Wheatstone avec les deux câbles bouclés, comme dans la méthode de Murray ; mais, au lieu de rattacher directement aux

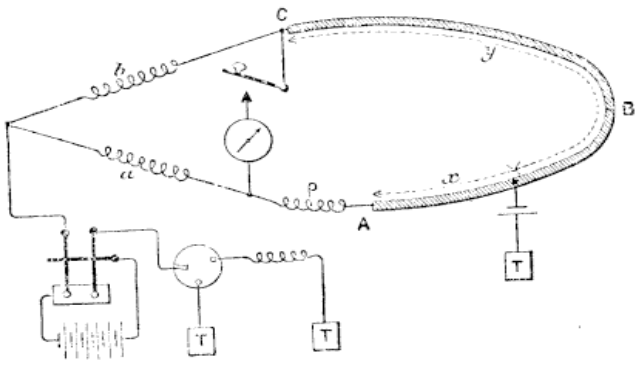


Fig. 359.

sommets A et B du pont les extrémités des deux câbles, on insère (fig. 359) une résistance variable ρ entre l'extrémité A du câble la plus rapprochée de la faute et le sommet voisin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les résistances des branches de comparaison du pont restent fixes. Lorsque l'équilibre est établi, on a, en conservant les notations précédentes,

$$\frac{a}{b} = \frac{z + x}{y} \qquad x + y = r_1 + r_2$$

d'où

$$x = \frac{a\,(r_1 + r_2) - b\,z}{a + b}$$

Comme précédemment, on fait les lectures du galvanomètre au faux zéro que l'on détermine à chaque mesure et on prend la valeur de z à l'instant où, sous l'action du courant, la faute recommence à se polariser. On fait la moyenne d'une série d'essais semblables.

On se place dans les conditions les plus favorables pour ces essais, en prenant a aussi grand que le comportent les appareils dont on dispose et b aussi petit que possible, sans toutefois qu'il soit inférieur à $\frac{G\,y}{G + y}$.

Correction de Taylor.

Les formules précédentes ont été établies en supposant le câble parfaitement isolé. Si l'on veut tenir compte de la *faute résultante* due à l'isolement défectueux moyen du conducteur, soit F_1 (fig. 360) la position inconnue de

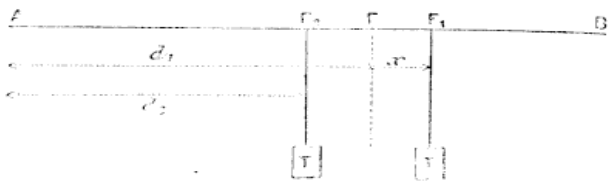


Fig. 360.

la faute accidentelle, F_2 celle de la faute résultante et F celle de la *faute apparente*, telle qu'elle est déterminée par les méthodes d'essais de la boucle. Désignons par

R la résistance d'isolement du câble, avant l'apparition de la faute,

R_1 la résistance d'isolement actuelle du câble,

r la résistance de la faute accidentelle, exprimée en unités de même ordre, ohm ou megohm, que R et R_1,

d_1 la distance AF de la faute apparente à l'extrémité A,

d_2 la distance AF_2 de la faute résultante à l'extrémité A,

x la distance FF_1 de la faute accidentelle à la faute apparente.

La conductibilité de la faute R_1, résultante de R et de r, est égale à la somme des conductibilités de ses deux composantes

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} + \frac{1}{r} \qquad (1)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si, poursuivant l'analogie de ce système avec celui de forces parallèles en Mécanique, nous lui appliquons le théorème des moments des forces, nous aurons

$$\frac{1}{R_1} x = \frac{1}{R} \left(x + d_1 - d_2 \right)$$

d'où

$$x = \frac{R_1}{R - R_1} \left(d_1 - d_2 \right)$$

Cette correction doit être appliquée dans tous les cas où la résistance de la faute n'est pas négligeable vis-à-vis de l'isolement total du câble. Lorsqu'on n'a pu déterminer antérieurement la position de la faute résultante naturelle, on admet qu'elle se trouve au milieu de la ligne.

Lorsqu'on ne connaît pas les résistances r_1 et r_2 des deux câbles bouclés,

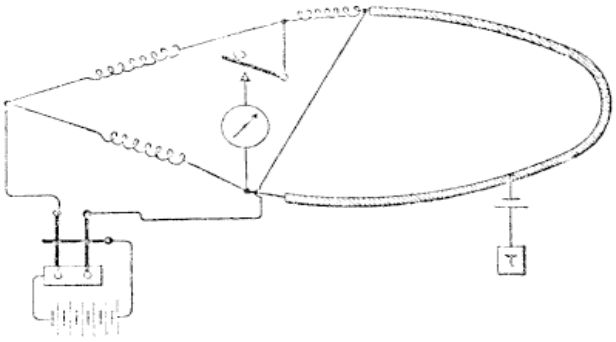


Fig. 361.

on peut en déterminer la somme $r_1 + r_2$ en formant avec les deux câbles la quatrième branche d'un pont de Wheatstone dans lequel n'entre d'autre terre que celle de la faute (fig. 361). Celle-ci n'a alors aucune influence sur la mesure, son effet se bornant à abaisser d'une même quantité le potentiel du conducteur en ce point et dans tout le système.

Si les câbles sont très longs ou si leur isolement général est faible, la valeur r' donnée par cette mesure pour la somme $r_1 + r_2$ doit être corrigée à l'aide de la formule de M. Hockin donnée plus haut

$$r = r' \left(1 + \frac{1}{3} \frac{r'}{R'} \right)$$

R' désignant l'isolement absolu des deux câbles avant l'apparition de la faute, r la valeur exacte de $r_1 + r_2$.

La méthode de Varley permet même de déterminer séparément les résistances r_1 et r_2 des deux câbles. Il suffit, après les avoir bouclés à l'extrémité éloignée, de prendre deux mesures en changeant le rapport $\frac{a}{b}$ des résistances débouchées dans les branches de comparaison du pont, ρ et ρ' représentant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les valeurs de la résistance variable qui correspondent à l'équilibre dans les deux cas, on a deux équations

$$\frac{a}{b} = \frac{z + r_1}{r_2}$$
$$\frac{a'}{b'} = \frac{z' + r_1}{r_2}$$

d'où l'on tire r_1 et r_2.

Ce procédé est employé avec avantage pour des câbles immergés qui sont parcourus par des courants telluriques intenses ou par des courants de polarisation des terres qui troublent les essais.

De la relation (1) ci-dessus on tire aussi la valeur de la résistance de la faute

$$r = \frac{R R_1}{R - R_1}$$

Dans les usines, pour déterminer avec précision la résistance des fils de secours qui mettent en communication les appareils placés dans les salles d'expériences avec les câbles lovés dans les cuves, on réunit ces fils par groupes de trois que l'on boucle deux à deux de diverses manières; en mesurant les résistances des trois circuits A et B, A et C, B et C (fig. 362), on obtient trois équations qui déterminent les valeurs de A, B et C.

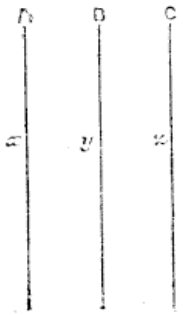


FIG. 362.

On avait songé aussi à vérifier l'état électrique des câbles, durant leur fabrication, en recherchant par la méthode de la boucle la position de la faute résultante. Mais comme les âmes sont confectionnées généralement au fur et à mesure des besoins seulement, les dernières bobines employées sont de dates plus récentes que les premières et ont par suite un isolement plus faible. La faute résultante ne se trouve donc plus au milieu de la partie fabriquée du câble, lors même que celle-ci serait en parfait état.

MÉTHODE DE WARREN

Cette méthode n'est applicable qu'aux âmes qui n'ont pas encore reçu leur armature de fer et dans lesquelles on a reconnu un défaut très léger; elle n'est employée conséquemment que dans les usines.

L'âme fautive est enroulée par moitiés sur deux tambours parfaitement isolés : l'une de ses extrémités est reliée à l'un des pôles d'une pile très puissante dont l'autre pôle est à la terre; la seconde extrémité du câble est en communication avec une paire de quadrants d'un électromètre, l'autre paire est à la terre.

Les deux tambours sont mis un instant en contact avec la terre, et isolés

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de nouveau; on rompt ensuite la communication de la pile avec l'âme dont les deux bouts restent ainsi isolés. Si les tambours sont convenablement isolés, l'électromètre, au bout de quelques minutes, ne doit accuser encore aucune déperdition d'électricité. Si l'on vient maintenant à mettre successivement chaque tambour à la terre, celui d'entre eux qui donnera la plus grande déviation à l'électromètre contiendra la faute. On déroule une certaine longueur d'âme de ce tambour pour l'enrouler sur l'autre et on recommence l'essai, après avoir eu soin de bien essuyer l'âme sur une longueur de 20 à 25 centimètres entre les deux tambours, pour éviter le passage de l'électricité de l'un d'eux à l'autre, par conduction. Lorsque le point défectueux se trouve dans l'intervalle compris entre les deux tambours, on essuie avec soin l'âme des deux côtés de la partie fautive; on touche cette dernière en divers points avec un fil de terre, jusqu'à ce que, à l'instant du contact, on produise une déviation sensible à l'électromètre.

§ 3. — LE CONDUCTEUR EN CUIVRE EST EN CONTACT AVEC LA MER ET ROMPU

Lorsque le conducteur en cuivre est à la fois en contact avec l'eau de la mer et entièrement interrompu, la détermination de la position de la faute est en général plus difficile, parce qu'aux effets des courants du câble, de polarisation et telluriques qui viennent troubler comme précédemment les expériences, vient s'ajouter une nouvelle inconnue, la résistance de la faute elle-même. La résistance que l'on mesure en formant avec le câble cassé un pont de Wheatstone, est en effet $R + r$ et se compose de celle R de la portion de ligne comprise entre l'extrémité où l'on expérimente et la faute, et celle r de la faute elle-même. Or, en général, les diverses méthodes qui donnent des valeurs à peu près correctes de $R + r$ ne permettent pas de calculer séparément ces deux quantités et l'expérimentateur en est réduit à apprécier au jugé la valeur de r pour la déduire de la somme. M. Kennelly a cependant fait récemment des efforts pour traiter la question à un point de vue plus scientifique et a indiqué des méthodes d'observations et de calcul permettant de déterminer avec précision r et par suite R.

Lorsqu'un câble est violemment rompu, la gutta-percha et le cuivre s'allongent à la fois, pendant que la traction s'exerce; après la rupture, le cuivre conserve son allongement, la gutta-percha au contraire revient sur elle-même et laisse ainsi à découvert les extrémités du toron cassé. La rupture se produisant le plus fréquemment en un même point du conducteur et du diélectrique, le cuivre déborde de sa gaine isolante, à chaque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bout du câble rompu. La saillie est en général de 15 à 18 millimètres, et cette longueur est suffisante pour que l'essai puisse se faire dans de bonnes conditions : un bout plus court se polarise et se dépolarise plus rapidement ; sa résistance est plus grande et les changements qui se produisent dans la mesure de la résistance du câble sont plus marqués et plus rapides. La résistance moyenne du bout d'un conducteur est comprise entre 10 et 40 ohms ; elle peut varier, dans certains cas plus rares, entre 5 et 75 ohms. Il peut arriver exceptionnellement néanmoins que la rupture du conducteur et de la gutta-percha se fasse en deux points différents : l'une des extrémités du cuivre peut alors être mise à nu sur une longueur de 2 ou 3 centimètres et avoir une résistance presque nulle, surtout si elle touche accidentellement l'armature en fer; l'autre extrémité est retirée au contraire à l'intérieur de la gutta et n'a qu'un contact plus ou moins imparfait avec l'eau de la mer, notamment si quelques bulles d'hydrogène restent emprisonnées à l'intérieur du tube, et isolent ainsi plus ou moins bien le bout du conducteur. La résistance des fautes peut donc, en réalité, bien qu'exceptionnellement, varier entre zéro [1] et l'infini. Néanmoins, l'un ou l'autre bout du conducteur se prête toujours assez commodément à des essais, de telle sorte qu'en se transportant successivement à chacune des deux extrémités de la ligne, on est certain de trouver, à l'une au moins des guérites, des conditions d'expérimentation favorables.

Lorsqu'une rupture se produit, on ne doit envoyer dans le câble que les courants électriques indispensables pour constater l'interruption, jusqu'au moment où ont lieu dans les guérites d'atterrissement les essais qui sont destinés à localiser la faute, et qui doivent être faits dans le plus court délai possible. Le bout du conducteur, lorsqu'il est fraîchement cassé, a, en effet, une surface brillante très favorable à ces mesures; mais au contact des substances salines tenues en dissolution dans l'eau de la mer, le cuivre se recouvre promptement d'une couche de matières terreuses qui troublent les expériences. L'envoi de courants inutiles accélère encore cette action. Les essais doivent toujours porter exclusivement sur le câble sous-marin et ne comprendre dans aucun cas une section terrestre, fût-elle même souterraine.

MESURE PAR LE PONT DE WHEATSTONE

Cette méthode, de même que la suivante, n'est applicable que lorsque la résistance de la faute est nulle. Il suffit alors d'introduire le câble dans un

[1] Dans les câbles dont l'âme est recouverte d'un ruban de cuivre de Müntz, pour éviter les attaques des animaux sous-marins, le bout du conducteur en cuivre, lorsqu'il est brisé, arrive fréquemment au contact de cette enveloppe et donne ainsi une terre parfaite.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pont de Wheatstone (fig. 363) dans lequel on met individuellement à la terre tous les points qui ordinairement sont reliés au quatrième sommet. Lorsque l'équilibre est établi, on a

$$x = \frac{a\,c}{b}$$

Si ρ représente la résistance du conducteur par mille marin, à une température déterminée, on ramène par le calcul x à cette température, et le

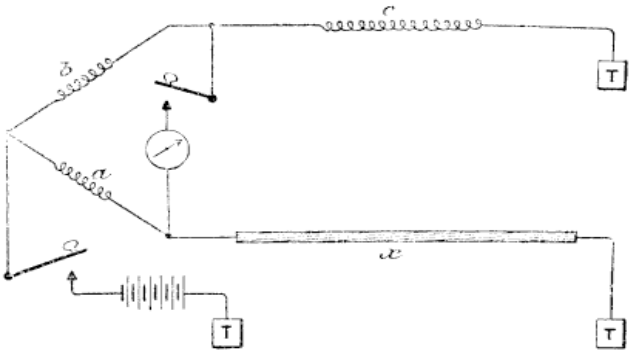


FIG. 363.

quotient par ρ de la valeur corrigée donne la distance en milles marins de la faute au rivage. On estime d'un autre côté, d'après le journal de la pose du câble, le mou dépensé d'heure en heure ; la différence portée sur une carte, en suivant le tracé du câble, permet d'y marquer la position exacte de la faute.

MÉTHODE DE CLARK PAR LA CHUTE DES POTENTIELS

La terre de la faute étant parfaite, si l'on relie le câble BC (fig. 364), par l'intermédiaire d'une résistance AB, à une pile dont l'autre pôle est mis à

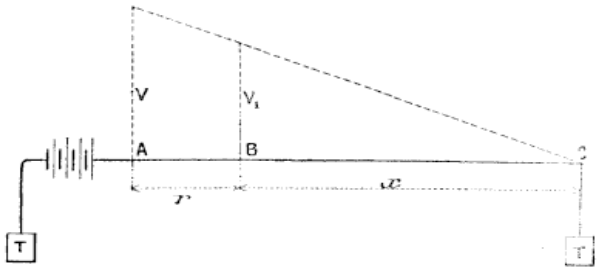


FIG. 364.

la terre, le potentiel de la ligne diminuera régulièrement depuis la pile jusqu'à la faute.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si donc on désigne par

x la résistance du câble depuis le point où l'on expérimente jusqu'à la faute,

r la résistance intercalée AB,

V le potentiel en A,

V_1 le potentiel en B,

on a

$$\frac{V}{V_1} = \frac{r + x}{x}$$

d'où

$$x = r \frac{V_1}{V - V_1}$$

Les potentiels V et V_1 sont mesurés à l'électromètre ou comparés à la force électromotrice d'un élément étalon, à l'aide d'une caisse de résistances à curseur et d'un galvanomètre par la méthode de réduction à zéro (page 357).

MÉTHODE DE LUMSDEN

Au lieu d'un galvanomètre à miroir, il est préférable d'employer, pour l'application de cette méthode, un galvanomètre astatique ordinaire, différentiel s'il est possible. Le courant de la pile traverse alors simultanément et en sens contraire (fig. 365) les deux circuits de l'instrument qui sont

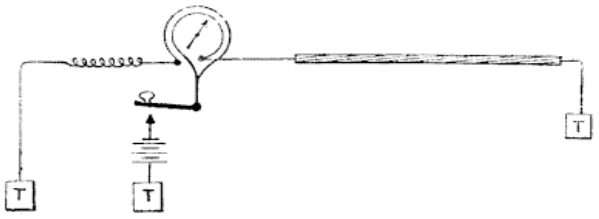


FIG. 365.

reliés l'un au câble, l'autre à une caisse de résistances dont l'extrémité opposée se trouve à la terre. Lorsque l'équilibre est établi, les résistances débouchées dans la caisse sont exactement égales à la somme des résistances du conducteur du câble et de la faute.

Après une première mesure approchée de la quantité cherchée, on nettoie et on dépolarise la faute avec soin, ainsi qu'il a été expliqué et on prend comme valeur de la résistance du câble et de la faute la résistance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

débouchée à l'instant où, par suite de la disparition du chlorure de cuivre, le gaz hydrogène commence à recouvrir le bout du conducteur.

Si les variations de résistance de la faute étaient trop rapides, on devrait diminuer la pile d'essais ou intercaler entre le câble et le galvanomètre une résistance auxiliaire dont on tiendrait compte.

Pour déterminer la résistance du câble seul jusqu'à la faute, on forme une faute artificielle avec un morceau de câble dont on dénude le bout sur une petite longueur ; on le plonge dans une cuvette remplie d'eau de mer que l'on relie à la terre par un fil de fer plongeant dans l'eau même de la cuvette. Un rhéostat, dans lequel on débouche une résistance à peu près égale à celle du conducteur, est placé entre la faute artificielle et le galvanomètre et représente le câble. On mesure la résistance de la ligne artificielle de la même manière que celle du câble et on fait varier à la fois la résistance du rhéostat et la grandeur de la faute, de façon à reproduire aussi exactement que possible toutes les circonstances que l'on a observées dans la mesure du câble lui-même. Lorsqu'on y est parvenu, on admet que la faute artificielle est égale à celle du câble ; la résistance proprement dite de ce dernier est donc exactement représentée par la résistance débouchée dans la caisse auxiliaire et celle de la faute elle-même s'obtient par différence.

Les deux tables ci-dessous dressées par M. Latimer Clark [1] indiquent les résistances obtenues dans des conditions d'expériences variées avec des bouts de cuivre de diverses longueurs.

TABLE I

Résistances en ohms de fautes artificielles. — Court-circuit. — Diamètre du fil 1mm,65.

Courant négatif — Nombre d'éléments	LONGUEUR EN MILLIMÈTRES DU BOUT DU CONDUCTEUR									
	Fil coupé au ras de la gutta-percha	1,6	3,1	6,3	9,5	12,7	19,0	25,4	50,8	76,2
3	400ω	235	212	190	180	170	159	147	143	135
6	182	102	91	82	76	72	66	64	60	59
12	119	57	49	41	38	36	33	32	30	29
24	90	41	34	28	25	23	21	20	18	17
36	85	37	30	24	21	19	17	16	15	14
48	82	36	29	23	20	18	17	16	14	12
60	84	34	26	21	18	17	15	14	12	11

[1] *Journal of the Society of telegraph Engineers and Electricians*, vol. XIII, année 1884, p. 348.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE II

Résistances en ohms de fautes artificielles. — Fil de cuivre de 1mm,65 de diamètre.

Courant négatif — Nombre d'éléments	LONGUEUR EN MILLIMÈTRES DU BOUT DU FIL										
	Fil coupé au ras de la gutta-percha	1,6	3,1	6,3	9,5	12,7	19,0	25,4	50,8	76,2	152,4
Court-circuit											
6	182ω	102	91	82	76	72	66	64	60	59	54
60	84	34	26	21	18	17	15	14	12	11	10
Différence	98	68	65	61	58	55	51	50	48	48	44
Avec 50 ohms en circuit											
6	184	117	103	95	89	87	82	80	74	73	65
60	80	34	37	22	19	17	16	15	12	12	10
Différence	104	83	66	73	70	70	66	65	62	61	55
Avec 100 ohms en circuit											
6	210	134	119	113	108	103	95	92	86	85	70
60	90	37	30	24	22	20	19	18	16	15	14
Différence	120	97	89	89	86	83	76	74	70	70	56
Avec 200 ohms en circuit											
6	260	172	157	142	138	131	120	117	114	109	91
60	90	40	33	28	25	24	22	21	19	18	15
Différence	170	132	124	114	113	107	98	96	95	91	76
Avec 300 ohms en circuit											
6	300	203	185	170	160	153	145	140	135	127	110
60	95	45	35	30	26	26	25	24	22	20	17
Différence	205	158	150	140	134	127	120	116	113	107	93
Avec 400 ohms en circuit											
6	335	225	219	190	185	175	162	157	150	145	122
60	107	55	50	50	48	48	47	49	48	45	43
Différence	228	170	169	140	137	127	115	108	102	100	79
Avec 500 ohms en circuit											
6	430	320	300	275	260	247	240	230	220	208	197
60	120	70	66	62	60	59	58	58	57	56	53
Différence	310	250	234	213	200	188	182	172	163	152	144

La résistance du galvanomètre était de 144 ohms. Les nombres ci-dessus donnent les résistances de la faute seule, non compris celle du galvanomètre et les autres résistances en circuit.

Cette méthode, très correcte pour éviter les effets de polarisation, est d'une application difficile, en ce qui concerne la mesure de la résistance de la faute elle-même et exige de la part de l'opérateur une très grande expérience.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MÉTHODE DE CLARK

On prend quelques morceaux d'une âme exactement semblable à celle du câble et on taille une extrémité de chacun d'eux de façon à mettre à découvert des longueurs de cuivre variables, ne dépassant pas 25 millimètres environ. On les plonge dans une cuvette pleine d'eau de mer reliée à la terre par un fil de fer; les autres extrémités de ces âmes sont attachées successivement à un rhéostat dans lequel on débouche des résistances variables. Ces lignes artificielles sont introduites dans un pont de Wheatstone et leurs résistances mesurées avec le courant négatif de deux piles de forces électromotrices très différentes, comprenant l'une 6 éléments, par exemple, l'autre 60. On laisse les résistances atteindre leurs valeurs maxima et on inscrit tous les résultats obtenus sur un tableau analogue à celui ci-dessous[1].

LONGUEUR EN MILLIMÈTRES DES BOUTS DE CUIVRE		3,1		6,3		12,7		19		25,4	
Nombre d'éléments		6	60	6	6	6	60	6	60	6	60
Résistances en ohms ajoutées aux bouts d'âmes.	25ω	296	96	270	84	259	79	233	75	226	72
	50	325	121	299	109	287	104	261	100	255	98
	100	385	172	357	160	345	155	319	151	312	148
	150	443	223	416	211	403	205	376	202	369	199
	200	502	274	475	262	461	256	433	253	426	250
	250	561	325	533	313	519	307	489	304	482	301
	300	620	376	592	364	577	358	546	355	539	352
	350	679	427	651	415	636	409	603	406	596	402
	400	738	478	709	466	694	460	660	457	653	453
	450	797	529	767	516	752	510	716	507	709	503
	500	856	580	825	567	810	561	773	558	766	554
	1000	1440	1090	1405	1076	1392	1070	1339	1066	1332	1062

On expérimente ensuite le câble exactement de la même manière que les lignes artificielles : si l'on trouve dans la table deux nombres se rapportant à un même bout et à une même résistance de rhéostat, et qui soient sensiblement égaux à ceux obtenus sur le câble avec 6 et 60 éléments, les extrémités des deux conducteurs doivent être à peu près semblables et on peut considérer la ligne artificielle comme équivalant, au point de vue de sa résistance électrique, au câble. Le nombre que l'on trouve sur la même ligne horizontale, à la première colonne de la table, donne donc la résistance du conducteur jusqu'à la faute.

[1] Culley, *Handbook of practical telegraphy*, p. 319.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Une table spéciale doit être dressée pour chaque faute à déterminer, au moment de commencer les essais, et par la personne même qui les fait, afin que le câble soit traité exactement de la même manière que la ligne artificielle. Les expériences sont donc longues et fastidieuses; leur valeur dépend exclusivement de l'habileté personnelle de l'opérateur.

On peut remarquer sur la table ci-dessus, que pour un même bout de cuivre, la résistance de la ligne artificielle diminue lorsque la pile d'essai augmente, et qu'avec une même pile, cette résistance croît plus rapidement que celle introduite par le rhéostat.

MÉTHODE DE KEMPE

Cette méthode est basée sur la mesure à peu près simultanée de la résistance du conducteur, y compris celle de la faute, et de la charge électrostatique de cette partie du câble.

Les communications sont disposées (fig. 366) comme pour un pont de Wheatstone ordinaire dans lequel la pile réunit les sommets B et C et le galvanomètre G_1 le sommet A et la terre. Un second galvanomètre G sert, avec une clef d'une forme spéciale, à mesurer la charge du câble. Cette clef se compose de deux leviers mobiles, l'un autour d'un axe K relié à la terre, l'autre autour d'un axe m relié au galvanomètre G. La partie postérieure du premier levier repose ordinairement sur une enclume en communication avec le galvanomètre G_1; en basculant, elle soulève le second levier et le détache de son enclume qui est reliée à la pile P. Le bras mobile du second levier est formé de deux parties métalliques L et L_1, séparées par une pièce en ébonite : L_1 est relié en permanence au sommet C. On voit maintenant que dans la position indiquée par le diagramme, les sommets B et C du pont sont en communication avec les deux pôles de la pile et le sommet A avec la terre par le galvanomètre G_1. Si l'on appuie sur la poignée du premier levier, G_1 est isolé, le circuit de la pile est rompu en L_1 et le sommet A du pont est en communication avec la terre, d'une part par les résistances b et c du pont, d'autre part par le galvanomètre G et les deux leviers.

Cela posé, le double manipulateur étant relevé, on mesure la résistance $R = r + z$, formée de celle r du conducteur jusqu'à la faute et de celle z de la faute elle-même.

On abaisse la clef du manipulateur et on mesure au galvanomètre G la décharge du câble ; soit d_1 la déviation correspondant à la première impulsion de l'aiguille. Enfin, on décharge la pile P dans un condensateur de capacité C, à travers le galvanomètre G ; soit d la déviation initiale de l'aiguille.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On connaît la capacité γ en microfarads d'une longueur de câble telle que la résistance du conducteur soit d'un ohm et la résistance formée par la branche a du pont, et les branches b et c combinées avec le galvanomètre G.

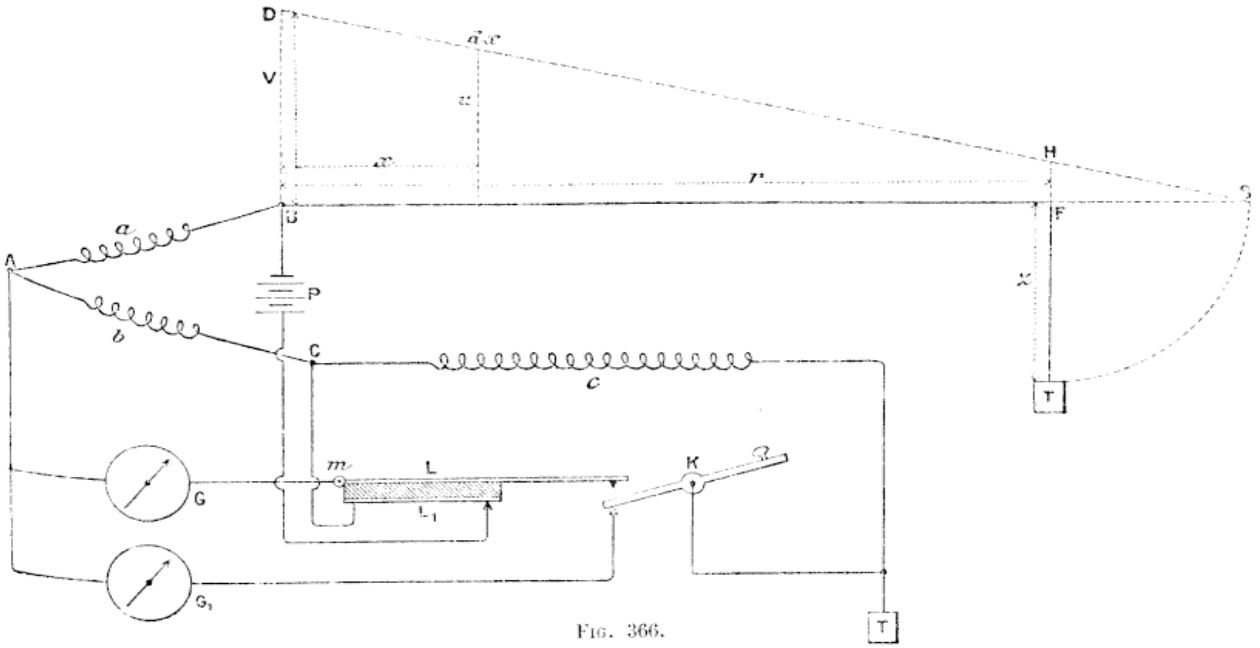


FIG. 366.

Cette résistance que nous désignerons pour abréger par ρ est, en désignant par a, b, c les résistances qui correspondent à l'équilibre dans la mesure de la résistance du cuivre,

$$\rho = a + \frac{(b + c)\,G}{b + c + G}$$

Pour trouver la relation qui lie entre elles ces différentes quantités et en déduire la valeur de r, désignons par

V le potentiel à l'extrémité B du câble,

u le potentiel à la distance x de B comptée en ohms,

q_1 la fraction de la charge électrostatique du câble qui s'échappe par l'extrémité B de la ligne,

q_2 la quantité d'électricité que prend le condensateur C, lorsqu'il est chargé au potentiel V.

$\gamma\,dx$ étant la capacité de l'élément dx du câble, l'élément différentiel de la charge sera $u\,\gamma\,dx$. Cette charge se divise en deux parties inversement proportionnelles aux résistances des circuits qu'elles traversent pour s'échapper à la terre. Celle qui passe par l'extrémité B du câble est exprimée par

$$dq_1 = u\,\frac{r + z - x}{r + z + \rho}\,\gamma\,dx \qquad (1)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'après la loi d'Ohm, i désignant l'intensité du courant qui circulait dans le câble,

$$V = i\,(r + z)$$
$$u = i\,(r + z - x)$$

d'où

$$u = V\,\frac{r + z - x}{r + z}$$

et en substituant dans (1)

$$dq_1 = V\,\frac{(r + z - x)^2}{(r + z + \rho)\,(r + z)}\,\gamma\,dx$$

$$q_1 = \frac{V\,\gamma}{(r + z + \rho)\,(r + z)}\int_0^r (r + z - x)^2\,dx$$

$$= \frac{V\,\gamma}{3}\,\frac{(r + z)^3 - z^3}{(r + z + \rho)\,(r + z)} \qquad (2)$$

Mais

$$q_2 = C\,V$$

d'où

$$V = \frac{q_2}{C}$$

Transportant cette valeur de V dans (2), il vient

$$q_1 = \frac{q_2\,\gamma\,[(r + z)^3 - z^3]}{3\,C\,(r + z + \rho)\,(r + z)}$$

d'où, en remplaçant z par sa valeur $z = R - r$,

$$(R - r)^3 = R^3 - \frac{3\,q_1\,C\,(R + \rho)\,R}{q_2\,\gamma}$$

Substituant à q_1 et q_2 les déviations d_1 et d_2 qui leur sont proportionnelles, on tire de cette relation

$$r = R - \sqrt[3]{R^3 - \frac{3\,d_1\,C\,(R + \rho)\,R}{d_2\,\gamma}}$$

Cette méthode permet de déterminer séparément la résistance du conducteur jusqu'à la faute et celle de la faute elle-même, mais suppose le câble à l'état neutre ; s'il était parcouru par des courants étrangers, on devrait d'abord en annuler l'effet par l'un des procédés que nous avons indiqués.

La difficulté d'obtenir une valeur à peu près exacte de q_1, une fraction notable de la charge du câble s'échappant par l'extrémité F durant le mouvement de bascule du levier K, restreint beaucoup l'application de cette méthode.

MÉTHODE DE MANCE

La méthode de Mance a pour but d'éliminer, dans la mesure de la résistance du cuivre d'un câble fautif, les effets des courants telluriques et de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

polarisation : elle ne donne pas la résistance du conducteur indépendamment de celle de la faute.

Deux mesures de la résistance sont prises avec le courant négatif, l'une après l'autre, aussi rapidement que possible, sans renverser ni même interrompre un seul instant le courant de la pile d'essais. Les résistances des branches de comparaison du pont sont seules modifiées entre les deux observations, de manière à nécessiter une modification correspondante dans la résistance de la troisième branche du pont.

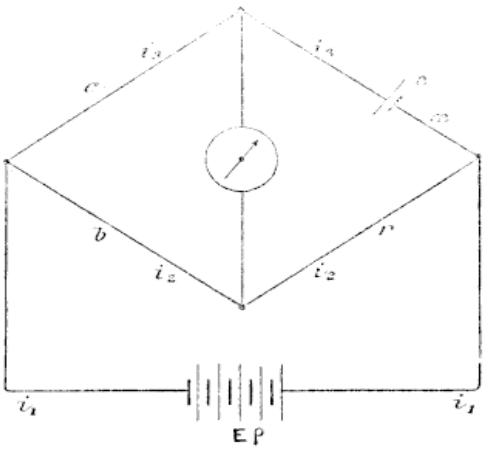


Fig. 367.

On prend ordinairement des branches de comparaison égales entre elles et on leur donne successivement les valeurs 100/100 et 1 000/1 000, en commençant par la première. Lorsque la résistance de la faute paraît avoir atteint une valeur fixe, on ferme pendant un instant la clef de court-circuit du galvanomètre ; on débouche, au lieu de 100/100, les résistances 1000/1000 et on cherche aussi rapidement que possible la résistance de la troisième branche correspondant au nouvel équilibre. L'essai se fait plus commodément, lorsque l'on peut ajouter à la caisse placée dans la troisième branche du pont une petite caisse de résistances à curseur simple dont chaque division correspond à un ohm. La résistance de la pile doit être connue exactement : il est préférable qu'elle ne soit pas très élevée. Enfin, l'essai réussit mieux lorsque la résistance comprise entre le câble et la faute est plus courte : on obtiendra donc de meilleurs résultats en expérimentant à la guérite d'atterrissement la plus rapprochée de la rupture.

La méthode s'applique manifestement aux câbles qui n'ont qu'une perte à la terre sans rupture du conducteur et même aux câbles en bon état qui sont parcourus par des courants étrangers, lorsqu'on veut mesurer la résistance de leur conducteur. Dans le premier cas, si la perte est faible, il convient d'ajouter à l'extrémité la plus voisine une résistance calculée de manière à ramener la faute au milieu à peu près de la ligne.

Désignons maintenant (fig. 367) par

a et b les résistances des deux branches de comparaison du pont,

r la résistance de la troisième branche correspondant à l'équilibre,

x celle du câble servant à former la quatrième branche,

E la force électromotrice de la pile d'essai,

p la résistance de la pile d'essai,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

e la force électromotrice des courants étrangers qui circulent dans le câble, cette force électromotrice pouvant agir dans le même sens que **E** ou dans le sens opposé,

i_1, i_2, i_3 les intensités des courants qui circulent dans les diverses branches au moment de l'équilibre, en remarquant d'ailleurs que le galvanomètre n'est traversé alors par aucun courant.

On a, par les lois de Kirchhoff,

$$i_1 = i_2 + i_3 \tag{1}$$
$$i_1 \rho + i_2 (b + r) - \mathrm{E} = 0 \tag{2}$$
$$i_3 \rho + i_3 (a + x) - \mathrm{E} + e = 0 \tag{3}$$
$$a i_3 - b i_2 = 0 \tag{4}$$
$$x i_3 - r i_2 + e = 0 \tag{5}$$

si e est de sens opposé à E. Lorsque e et E agissent dans le même sens, les équations (3) et (5) deviennent

$$i_1 \rho + i_3 (a + x) - \mathrm{E} - e = 0 \tag{6}$$

et

$$x i_3 - r i_2 - e = 0 \tag{7}$$

Si entre les équations (1), (2), (4) et (5), on élimine i_1 et i_2, on a

$$i_3 \left(x - \frac{a}{b} r \right) + e = 0$$
$$i_3 \left[\frac{a + b}{b} \rho + a \frac{b + r}{b} \right] - \mathrm{E} = 0$$

d'où

$$e = \frac{a r - b x}{(a + b) \rho + (b + r) a} \mathrm{E} \tag{8}$$

Si les résistances a et b des branches de comparaison sont égales entre elles et que **P** soit leur valeur commune, l'équation (8) devient

$$e = \frac{r - x}{2 \rho + \mathrm{P} + r} \mathrm{E} \tag{9}$$

Ainsi, $x < r$ lorsque e agit en sens contraire de **E**.

Si l'on prend, au lieu de (4) et (5), les équations (6) et (7) qui n'en diffèrent que par le changement de e en $-e$, on obtient au lieu de (9) l'équation

$$e = \frac{x - r}{2 \rho + \mathrm{P} + r} \mathrm{E} \tag{10}$$

et par conséquent $x > r$.

Si l'on fait deux observations en prenant successivement $\mathrm{P} = \mathrm{P}_1$ et $\mathrm{P} = \mathrm{P}_2$ et si r_1 et r_2 sont les valeurs correspondantes de r qui donnent l'équilibre chaque fois; si les observations sont d'ailleurs faites assez rapidement pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que e reste constant, c'est-à-dire pour que les courants de terre, du câble et de polarisation ne puissent varier dans l'intervalle, on a, avec l'équation (9)

$$i = \frac{r_1 - x}{2\rho + P_1 + r_1} E \qquad i = \frac{r_2 - x}{2\rho + P_2 + r_2} E$$

Egalant ces deux valeurs de e, on en tire

$$x\left[\frac{1}{2\rho + P_1 + r_1} - \frac{1}{2\rho + P_2 + r_2}\right] = \frac{r_1}{2\rho + P_1 + r_1} - \frac{r_2}{2\rho + P_2 + r_2} \qquad (11)$$

$$x = \frac{r_1(2\rho + P_2) - r_2(2\rho + P_1)}{P_2 - P_1 + r_2 - r_1} \qquad (12)$$

Avec l'équation (10) on a, dans les mêmes conditions,

$$i = \frac{x - r_1}{2\rho + P_1 + r_1} E \qquad i = \frac{x - r_2}{2\rho + P_2 + r_2} E$$

Egalant les deux valeurs de i

$$x\left[\frac{1}{2\rho + P_1 + r_1} - \frac{1}{2\rho + P_2 + r_2}\right] = \frac{r_1}{2\rho + P_1 + r_1} - \frac{r_2}{2\rho + P_2 + r_2}$$

équation identique à l'équation (11) ci-dessus. On en conclut que la même formule (12) est applicable dans tous les cas, quel que soit le sens dans lequel agit la force électromotrice des courants autres que ceux produits par la pile d'essais. En général, si $P_2 > P_1$, on a $r_2 > r_1$; des courants telluriques variables peuvent cependant renverser quelquefois cette inégalité.

EXEMPLE

Section Jask-Gwadur du câble du golfe Persique. Résistance du conducteur de la ligne en bon état : 1763ω. Câble rompu, conducteur à la terre des deux côtés.

Essais ordinaires faits à Gwadur :

Par courant —	1 936 ω
id. +	1 886
Moyenne	1 911

Par la méthode de Mance :

Essais à Gwadur. $P_1 = 100$, $P_2 = 1\,000$

	ρ	r_1	r_2	
1re série	115	1 803	1 819	$x = \frac{1\,803 \times 1\,230 - 1\,819 \times 330}{916} = 1\,766$
2e série	115	1 872	1 923	$x = \frac{1\,872 \times 1\,230 - 1\,923 \times 330}{951} = 1\,754$

Essais à Jask. $P_1 = 10$, $P_2 = 100$

	ρ	r_1	r_2	
10 éléments	6	42	51	$x = 36$
30 éléments	20	39	43	$x = 38$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Avec $P_1 = 100$, $P_2 = 1\,000$

	ρ	r_1	r_2	
10 éléments	6	51	130	$x = 37$
30 éléments	20	43	77	$x = 36$

La rupture fut trouvée à 4 milles ou 24 ohms de Jask; la résistance du conducteur seul, entre la rupture et Gwadur, était par suite de 1 739 ω, celle du premier bout de cuivre de 13 ω, celle du second de 21 ω environ.

Le tableau ci-dessous [1], dû à sir Henry Mance, donne les résistances de quelques fautes artificielles, de diverses longueurs, mesurées avec différentes intensités de piles et des résistances interposées variables.

TABLE

donnant la résistance approximative de quelques fautes artificielles de différentes grandeurs, avec des piles d'intensités diverses et des résistances variables interposées. Les bouts de cuivre étaient immergés dans de l'eau de mer.

LONGUEUR DE CUIVRE en millimètres mis à nu à la faute	PILE		RÉSISTANCE en ohms de la ligne jusqu'à la faute	RÉSISTANCE r MESURÉE avec branches de comparaison		RÉSISTANCE de la faute	REMARQUES
	Nombre d'éléments	Résistance ρ		$\frac{100}{100}$	$\frac{1000}{1000}$		
	10	10	0	13	69	5	
	30	220	0	21	47	9	
	60	440	0	18	32	3	
	10	10	500	546	598	8	
	30	220	500	539	565	8	
	60	440	500	528	542	5	
18,9	10	210	0	42	96	10	
	30	420	0	35	60	8	
	60	640	0	20	30	5	
	10	210	500	555	595	9	Lectures faciles pour toutes les fautes, sauf les deux dernières.
	30	420	500	540	556	14	
	10	10	2000	2100	2135	16	
12,7	60	550	250	294	317	6	
	10	10	0	30	157	11	
8,4	30	250	0	41	88	9	
	30	250	1000	1087	1130	10	
6,3	60	550	250	288	307	7	
3,2	60	550	250	292	312	13	
1,5	60	550	250	305	325	22	
Cuivre coupé au ras de la gutta-percha.	60	550	250	317	342	26	Avec le courant positif, r dépassait 1000.

MÉTHODE DE KENNELLY

On sait depuis longtemps, et les tableaux de MM. Latimer Clark, Culley et sir H. Mance que nous avons donnés plus haut le prouvent, que la résis-

[1] *Journal of the Society of telegraph Engineers and Electricians*, vol. XIII, année 1884, p. 336.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tance d'une faute diminue lorsque la surface du cuivre en contact avec l'eau de mer augmente ou lorsque l'intensité du courant qui traverse la faute est plus considérable. M. Kennelly, à la suite de nombreuses expériences dont il a rendu compte à la Société des ingénieurs des télégraphes de Londres [1], a formulé les deux lois suivantes :

1° Pour une même surface de cuivre en contact avec l'eau de mer, la résistance de la faute est inversement proportionnelle à la racine carrée de l'intensité du courant qui la traverse ;

2° La résistance de la faute, lorsque l'intensité du courant qui la traverse

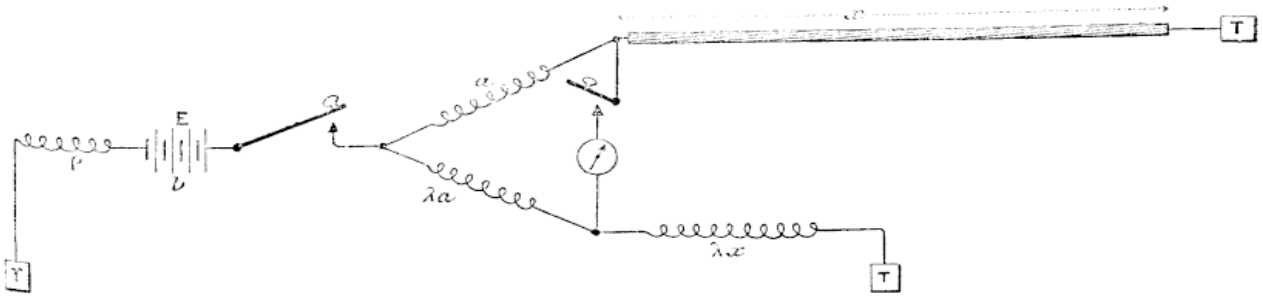


FIG. 368.

est constante, est inversement proportionnelle à la racine carrée de la surface de cuivre en contact avec l'eau de mer.

Si donc r désigne la résistance de la faute pour une intensité de courant I et une surface de cuivre S exposée à l'action de l'eau de mer, r_0 la résistance de la même faute pour l'unité de surface de cuivre et l'unité de courant, on a

$$r = \frac{r_0}{\sqrt{S\,I}}$$

sous la condition toutefois, formulée par M. Kennelly lui-même, que $I < 25$ milliampères.

La connaissance de ces deux lois, dont l'une est la conséquence de l'autre, permet de déterminer entièrement par l'expérience la résistance proprement dite d'une faute, cette résistance en l'absence de toute indication contraire, étant par définition celle qui se rapporte à l'unité pratique du courant, au milliampère. Les courants étrangers, telluriques et de polarisation, doivent être éliminés par une autre méthode, celle du faux zéro, par exemple.

On commence par déterminer approximativement, soit par la méthode différentielle, soit avec un pont de Wheatstone, la résistance $R + r$ du câble rompu, R désignant celle du câble jusqu'à la faute, r celle de la faute. On donne aux communications, dans le second cas, les dispositions représentées

[1] *Journal of the Society of telegraph Engineers and Electricians*, vol. XVI, année 1887, p. 222.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par la figure 368 en employant de préférence un galvanomètre apériodique qui permet d'observer plus rapidement le faux zéro. On introduit entre la pile d'essais, dont la force électromotrice E et la résistance intérieure b doivent être déterminées à l'avance, et la terre des résistances variables ρ, calculées de manière à faire varier de 1 à 25 milliampères l'intensité du courant qui traverse la faute r. On cherche, pour chacun de ces courants, la résistance qui, dans la troisième branche du pont, donne l'équilibre, en laissant invariables, pendant la série de ces essais, les deux branches de comparaison, chaque opération étant faite au faux zéro déterminé spécialement. Tous les résultats obtenus étant inscrits dans un tableau, on prend les résistances R_1 et R_2 correspondant la première au courant de 3 milliampères, par exemple, la deuxième à un courant d'intensité quadruple ou de 12 milliampères. On aura

$$R_1 = R + K\,r \qquad \text{et} \qquad R_2 = R + K\,\frac{r}{2}$$

d'où

$$R_1 - R_2 = K\,\frac{r}{2}$$

et la résistance du câble jusqu'à la faute

$$R = R_2 - (R_1 - R_2) = 2\,R_2 - R_1$$

Les valeurs à donner à la résistance ρ que l'on insère entre la pile et la terre, pour obtenir à la faute des courants gradués d'intensités déterminées, se calculent de la manière suivante. Désignons par x la résistance $R + r$ à mesurer, par a la résistance de la branche de comparaison du pont la plus voisine du câble, par λa celle de la deuxième branche, λ étant par suite généralement égal à 1, 10 ou 100 ; la résistance de la quatrième branche sera λx lorsque l'équilibre sera établi.

Si l'on néglige les courants telluriques et de polarisation, l'intensité du courant provenant de la pile d'essai sera, au moment de l'équilibre,

$$\frac{E}{\rho + b + \frac{\lambda\,(a + x)}{1 + \lambda}}$$

La partie de ce courant qui circulera dans le câble sera

$$\frac{E\,\lambda}{(\rho + b)\,(1 + \lambda) + \lambda\,(a + x)} = \frac{n}{1\,000}$$

$\frac{n}{1000}$ désignant ce même courant en milliampères. On tire de cette relation

$$\rho = \frac{1\,000\,E\,\frac{\lambda}{1 + \lambda}}{n} - \left(b + \frac{\lambda\,a}{1 + \lambda}\right) - x\,\frac{\lambda}{1 + \lambda}$$

On prend pour x la valeur qui en a été déterminée approximativement ; on donne à n les valeurs 1, 2, 3..... 25 et on calcule les valeurs correspondantes de ρ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

EXEMPLE [1]

La pile comprend 38 éléments Leclanché,

$$E = 52{,}344 \text{ volts et } b = 70 \text{ ohms}$$

Faisant

$$a = 100\ \omega, \qquad a\lambda = 1\,000\ \omega$$

d'où

$$\lambda = 10$$

on a

$$\rho = \frac{909{,}1 \times 52{,}344}{n} - \left(70 + \frac{10}{11}\,100\right) - \frac{10}{11}\,x = \frac{47\,585}{n} - 160 - \frac{10}{11}\,x$$

On peut, pour une première approximation, négliger complètement le terme $\frac{10}{11}\,x$ et prendre ensuite pour x les valeurs successives de plus en plus approchées que l'on obtient dans le cours même des expériences. On fait au besoin quelques essais supplémentaires au début et on forme un tableau analogue à celui ci-dessous des résultats obtenus :

Intensité du courant à travers la faute en milliampères.	$\frac{47585}{n}$	$\frac{47585}{n} - 160$	Première valeur approchée de ρ	Valeur correspondante mesurée de x, en ohms	$\frac{10}{11}\,x$	Deuxième valeur approchée de ρ $\frac{47585}{n} - 160 - \frac{10}{11}\,x$	Valeur observée de x, en ohms
1	47585	47425	46000	1900	1727	45700	1888,2
2	23792	23632	21900	1850	1682	21950	1833,2
3	15862	15702	14000	1828	1662	14040	1828,2
4	11896	11736	»	»	1657	10080	1823,1
5	9517	9357	»	»	1653	7700	1818,1
6	7931	7771	»	»	1647	6120	1813,1
7	6798	6638	»	»	1646	4990	1811,1
8	5948	5788	»	»	1645	4140	1809,1
9	5287	5127	»	»	1643	3480	1807,1
10	4759	4599	»	»	1642	2960	1805,1
11	4326	4166	»	»	1640	2530	1804,1
12	3966	3806	»	»	1639	2170	1803,1
13	3660	3500	»	»	1638	1860	1802
14	3399	3239	»	»	1637	1600	1801
15	3172	3012	»	»	1637	1375	1801
16	2974	2814	»	»	1636	1180	1800
17	2799	2639	»	»	1636	1000	1799,5
18	2643	2483	»	»	1636	847	1799
19	2504	2344	»	»	1636	708	1799
20	2379	2219	»	»	1635	584	1798,5
21	2266	2106	»	»	1635	471	1798,5
22	2163	2003	»	»	1634	369	1798
23	2069	1909	»	»	1634	275	1797,5
24	1982	1822	»	»	1634	188	1797
25	1903	1743	»	»	1634	109	1797
26	1830	1670	»	»	1633	37	»
27	1762	1602	»	»	1633	»	»

[1] *Loc. cit.*, p. 240.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Prenons maintenant dans la table les résistances mesurées avec les courants de 3 et de $3 \times 2^2 = 12$ milliampères.

$$R_1 = 1\,828{,}2 \qquad R_2 = 1\,803{,}1$$

on en conclut

$$R = 2 \times 1\,803{,}1 - 1\,828{,}2 = 1\,778\ \omega$$

Avec les courants de 4 et de $4 \times 2^2 = 16$ milliampères, on a de même

$$R_1 = 1\,823{,}1 \qquad R_2 = 1\,800$$
$$R = 2 \times 1\,800 - 1\,823{,}1 = 1\,776{,}9\ \omega$$

Avec 5 et $5 \times 2^2 = 20$ milliampères,

$$R_1 = 1\,818{,}1 \qquad R_2 = 1\,798{,}5$$
$$R = 2 \times 1\,798{,}5 - 1\,818{,}1 = 1\,778{,}9$$

On calcule ainsi un grand nombre de valeurs de R dont on prend la moyenne. Dans la pratique, on peut se borner à faire un nombre impair d'observations avec des courants de 3 à 5 milliampères et leurs quadruples 12, 16 et 20.

La résistance de la faute pour les diverses intensités de courants considérées serait

Intensité du courant en milliampères.	Résistance de la faute en ohms.
3	50,2
4	46,2
5	39,2
12	25,1
16	23,1
20	19,6

Pour éviter, malgré l'emploi du faux zéro, les effets des courants telluriques et de polarisation, il convient d'opérer avec une pile puissante ; la mesure se prend toujours avec le courant négatif.

§ 4. — LE CONDUCTEUR EST ROMPU OU PRÉSENTE EN UN DE SES POINTS UNE TRÈS GRANDE RÉSISTANCE, MAIS SANS SE TROUVER EN CONTACT AVEC L'EAU DE MER.

1°. — LE CONDUCTEUR EST ENTIÈREMENT ROMPU

On mesure par l'une des méthodes connues la capacité électrostatique de la partie du câble comprise entre le rivage et la rupture. Le quotient de ce nombre par la capacité électrostatique du câble par mille marin donne la distance de la rupture comptée en milles sur le câble.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En chargeant le câble et le déchargeant à travers un galvanomètre, rapidement et un grand nombre de fois, on peut obtenir une déviation fixe de l'aiguille aimantée, plus commode à observer que l'angle d'écart dû à une première impulsion. Le diagramme (fig. 369) représente la disposition qui a été adoptée à cet effet, en 1867, par J. Raynaud pour la localisation d'un défaut de cette nature sur la ligne de Bizerte à Marsala. Le levier mobile A d'un manipulateur à cadran est relié au câble isolé ; les deux vis V et V' entre lesquelles oscille le ressort qui termine le levier A sont en communication, la première avec le galvanomètre G, la seconde avec la pile P. Il suffit de répéter l'expérience en substituant au câble un condensateur de capacité connue C. Le rapport des déviations obtenues dans les deux cas est égal à celui des capacités x et C du câble et du condensateur

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{x}{C}$$

d'où

$$x = C\,\frac{d_1}{d_2} \text{ microfarads}$$

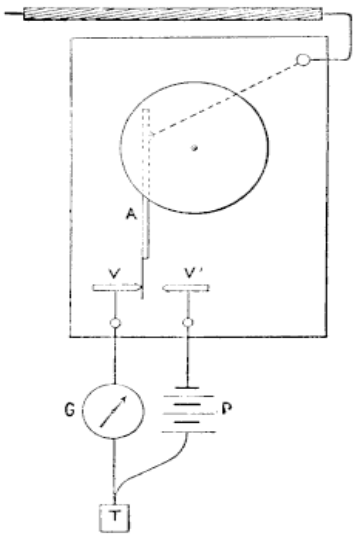


Fig. 369.

On en conclut facilement la distance du défaut en milles marins.

La méthode de M. Gott que nous avons exposée page 387, et qui donne une balance électrique tout à fait analogue au pont de Wheatstone, permet d'observer un état d'équilibre stable de l'aiguille aimantée et est également très avantageuse.

2° LE CONDUCTEUR PRÉSENTE SEULEMENT EN UN DE SES POINTS UNE TRÈS GRANDE RÉSISTANCE

Méthode d'Ayrton et Perry.

La rupture partielle d'un conducteur à l'intérieur de son enveloppe isolante restée intacte est un genre de défaut heureusement très rare qui peut résulter notamment de la désagrégation d'une soudure du toron en cuivre, lorsqu'une traction est exercée sur le câble. La méthode suivante, due à MM. les professeurs W.-E. Ayrton et John Perry, permet de localiser avec une précision suffisante ce genre de défauts.

Les communications étant disposées comme l'indique la figure 370, soient :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

f la résistance anormale que présente, entre les points C et D, le conducteur A B du câble,

l la résistance du conducteur avant l'apparition de la faute,

x la résistance de la partie A C du conducteur,

r une résistance connue que l'on insère entre l'extrémité éloignée du câble et la terre,

r_1 une résistance égale à celle de la pile d'essais P,

g et g' les résistances des deux galvanomètres G et G'. Le premier G de

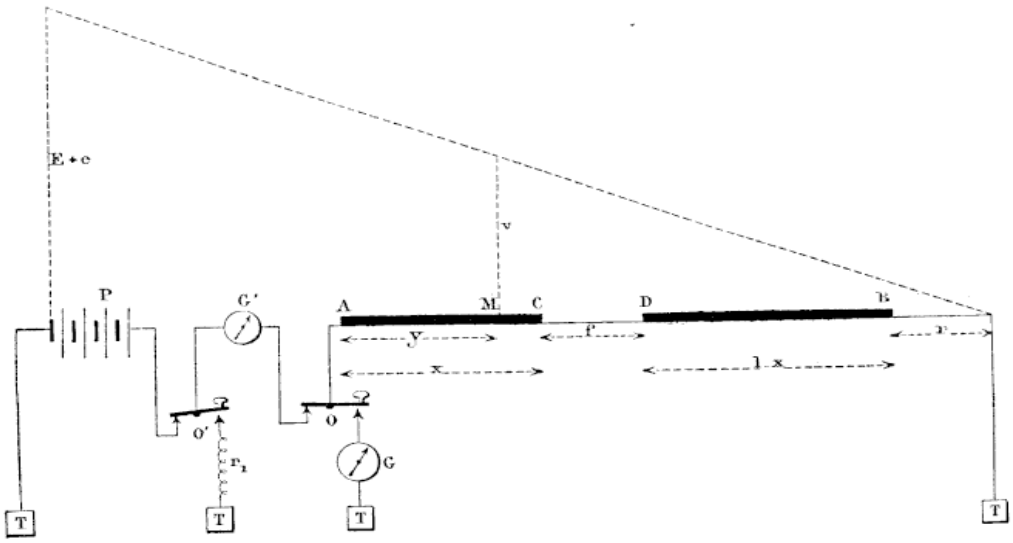


FIG. 370.

ces instruments est un galvanomètre à miroir, à déviations angulaires conséquemment toujours faibles ; son équipage mobile doit avoir un moment d'inertie considérable, mais ne pas offrir à l'air, dans ses mouvements, une résistance sensible. Le galvanomètre G' est apériodique, mais d'ailleurs quelconque.

La clef O' étant abaissée, on observe d'abord en G' le sens et l'intensité du courant naturel du câble. On dispose ensuite la pile P de telle sorte que le courant qu'elle tend à envoyer sur la ligne soit de même sens que le courant naturel du câble. On relève la clef O' et on règle le galvanomètre G' de manière à obtenir une bonne déviation sous l'influence du courant dû à la pile P.

On abaisse de nouveau la clef O' et on observe le courant du câble : s'il est encore appréciable, mais sans avoir changé de sens, on établit un nouveau contact avec la pile P et on répète les mêmes manœuvres jusqu'à ce que, par l'effet de la polarisation des plaques de terre due à la pile, le courant naturel devienne nul ou au moins négligeable. A ce moment, on abaisse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rapidement la clef O et on observe successivement la déviation a_1 de l'aiguille aimantée G à sa première élongation et la déviation fixe a_r qu'elle prend après une série d'oscillations. Si les variations rapides du courant tellurique ne permettaient pas de lire directement a_r, on prendrait la moyenne des écarts extrêmes a_1 et a_2 de l'aiguille à sa première oscillation complète de part et d'autre du zéro et on aurait avec une précision suffisante

$$a_r = \frac{a_2 - a_1}{2}$$

La déviation inconnue a, due à la décharge seule du câble, abstraction faite par conséquent de l'action du courant permanent durant la première oscillation de l'aiguille, se déduit des données précédentes à l'aide de la relation [1]

$$a = \sqrt{a_1^2 + 2\, a_1\, a_r}$$

[1] En effet, si A désigne le moment d'inertie de l'aiguille et de son équipage de suspension, M son moment magnétique, H la composante horizontale du magnétisme terrestre au lieu où l'on opère, et si d'ailleurs l'aiguille est placée, à l'état de repos, dans le plan du méridien magnétique, on sait (Maxwell. *Traité d'électricité et de magnétisme*, vol. II, p. 347) que, sous l'influence de la décharge instantanée d'une quantité Q d'électricité, l'aiguille prendrait une vitesse initiale $\left(\frac{da}{dt}\right)_0$ et atteindrait une élongation a définies par la relation

$$\frac{1}{2} A \left(\frac{da}{dt}\right)_0^2 = M H (1 - \cos a) \qquad (1)$$

Cette égalité exprime que la force vive communiquée à l'aiguille par la décharge Q est égale au travail résistant du couple magnétique terrestre. Si à ce travail résistant on ajoute celui I M G sin a_1, dû au courant I qui tend à donner à l'aiguille une déviation a_r de sens opposé à a (fig. 371), G représentant la constante du galvanomètre et a_1 l'élongation extrême de l'aiguille sous l'action combinée de ces diverses forces, on aura

$$\frac{1}{2} A \left(\frac{da}{dt}\right)_0^2 = M H (1 - \cos a_1) + I M H \sin a_1 \qquad (2)$$

Comme

$$I = \frac{H}{G} \operatorname{tg} a_r \qquad (3)$$

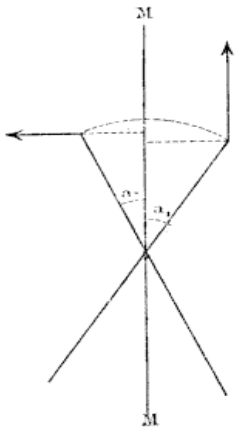


FIG. 371.

si dans l'équation (2) on remplace $\frac{1}{2} A \left(\frac{da}{dt}\right)_0^2$ et I par leurs valeurs tirées de (1) et (3), il viendra

$$M H (1 - \cos a) = MH (1 \cos - a_1) + M H \sin a_1 \operatorname{tg} a_r$$

ou

$$\cos a_1 - \cos a = \sin a_1 \operatorname{tg} a_r$$

d'où, puisque les angles a, a_1 et a_r sont très petits, on tire approximativement

$$a = \sqrt{a_1^2 + 2\, a_1\, a_r}$$

On peut remarquer en outre que si l'aiguille, sollicitée par le couple terrestre et le courant I, décrit ensuite un angle a_2 de l'autre côté du méridien magnétique, le travail dû aux forces magnétiques sera, pour la terre

$$M H (\cos a_2 - \cos a_1)$$

et pour le courant

$$I M G (\sin a_1 + \sin a)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

R désignant la résistance actuelle du câble et du rhéostat r, obtenue par une mesure directe,

$$R = l + f + r \tag{1}$$

n le rapport de la force électromotrice e du courant du câble à celle E de la pile P

$$n = \frac{e}{E}$$

γ la capacité électrostatique de l'unité de longueur du câble,

ρ la résistance du cuivre de l'unité de longueur du câble,

v le potentiel en un point quelconque M dû à l'action combinée de la pile P et du courant du câble,

v' le potentiel en ce même point sous l'action du courant du câble seul.

y la résistance de la partie A M du conducteur,

la charge de l'élément de câble de longueur $\frac{dy}{\rho}$ est, avant la manœuvre de la clef O,

$$\gamma v \frac{dy}{\rho}$$

et après cette manœuvre

$$\gamma v' \frac{dy}{\rho}$$

Cet élément perd donc, pendant la décharge, une quantité d'électricité égale à

$$\gamma (v - v') \frac{dy}{\rho}$$

et dont une partie seulement égale à

$$\frac{R - y}{g + R} \gamma (v - v') \frac{dy}{\rho} \tag{2}$$

traverse le galvanomètre G. Mais

$$\frac{v}{E (1 + n)} = \frac{R - y}{r_1 + g' + R}$$

et (fig. 372)

$$\frac{v'}{n E} = \frac{R - y}{g + R}$$

Comme les vitesses initiale et finale de l'aiguille sont nulles, la somme de ces travaux est également nulle

$$M H (\cos a_2 - \cos a_1) + I M G (\sin a_1 + \sin a_2) = 0$$

ou

$$\cos a_2 - \cos a_1 + (\sin a_1 + \sin a_2) \operatorname{tg} a_r = 0$$

et approximativement

$$a_r = \frac{a_2 - a_1}{2}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Substituant dans (2), on a pour la partie de la charge de l'élément dy qui traverse G,

$$\frac{E\gamma}{\rho}\,\frac{g+R+n(g-r_1-g')}{(g+R)^2(r_1+g'+R)}\,(R-y)^2\,dy$$

La décharge totale Q du câble, à travers G, sera donc

$$Q=\frac{E\gamma}{\rho}\,\frac{g+R+n(g-r_1-g')}{(g+R)^2(r_1+g'+R)}\left[\int_o^x (R-y)^2\,dy+\int_{x+f}^{l+f}(R-y)^2\,dy\right]$$

ou, en posant

$$\frac{1}{3\rho}\,\frac{g+R+n(g-r_1-g')}{(g+R)^2(r_1+g'+R)}=U \qquad (3)$$

$$Q=-E\gamma U\left[3(R-l-r)x^2+3[(l+r)^2-R^2]x-l^3-3l^2r-3lr^2\right] \qquad (4)$$

Si l'on charge maintenant un condensateur de capacité C avec la pile P,

FIG. 372.

qu'on le décharge à travers le galvanomètre G réglé exactement comme précédemment, et que α soit la déviation obtenue à la première élongation de l'aiguille, on aura

$$\frac{\alpha}{CE}=\frac{a}{Q}$$

Par suite

$$\frac{a}{\alpha}=-\frac{\gamma}{C}U\left[3(R-l-r)x^2+3[(l+r)^2-R^2]x-l^3-3l^2r-3lr^2\right]$$

On tire de là

$$x=\frac{R^2-(l+r)^2\pm\sqrt{\left[R^2-(l+r)^2\right]^2+\frac{4}{3}(R-l-r)\left(l^3+3l^2r+3lr^2-\frac{aC}{\alpha\gamma U}\right)}}{2(R-l-r)} \qquad (5)$$

Mais à cause de (1)

$$\frac{R^2-(l+r)^2}{2(R-l-r)}=l+r+\frac{f}{2}$$

et comme x est nécessairement toujours inférieur à l, les valeurs correspondant au signe — du radical sont seules admissibles.

Choix de la résistance r. — Bien que la résistance r puisse être prise arbitrairement, il est préférable de la choisir telle que, pour une variation donnée de x, la variation correspondante de Q soit maximum. Il faut donc

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déterminer la valeur de r qui rend maximum $\frac{dQ}{dx}$ et qui par conséquent satisfait à la fois aux deux relations

$$\left.\begin{aligned}&\frac{d^2Q}{dx\,dr}=0\\&\frac{d^2Q}{dx\,dr^2}<0\end{aligned}\right\}\qquad(6)$$

Or l'équation (4), combinée avec (1) et (3) donne

$$\frac{dQ}{dx}=\frac{E\gamma}{\rho}\,\frac{g+l+f+r+n(g-r_1-g')}{(g+l+f+r)^2(r_1+g'+l+f+r)}\left[-2fx+f^2+2f(l+r)\right]\qquad(7)$$

Le rapport n étant généralement une fraction assez petite et f un nombre très grand, on peut négliger $n(g-r_1-g')$ devant $g+l+f+r$. Si donc on pose

$$\begin{aligned}r_1+g'+l+f&=S\\g+l+f&=T\\l+\frac{f}{2}-x&=W\end{aligned}$$

l'équation (7) devient

$$\frac{dQ}{dx}=\frac{2fE\gamma}{\rho}\,\frac{W+r}{(S+r)(T+r)}$$

Par suite,

$$\frac{d^2Q}{dx\,dr}=-\frac{2fE\gamma}{\rho}\,\frac{r^2+2Wr+WS-ST+TW}{(S+r)^2(T+r)^2}$$

Pour que la première des équations de condition (6) soit satisfaite, il faut donc que

$$r^2+2Wr+WS-ST+TW=0$$

ce qui donne

$$r=-W\pm\sqrt{W^2-WS+ST-TW}$$

r étant une quantité essentiellement réelle et positive, on ne peut admettre que le signe + du radical et il faut que

$$\sqrt{W^2-WS+ST-TW}>W$$

ou que

$$ST-WS-TW>0$$

c'est-à-dire

$$(r_1+g'+l+f)(g+l+f)-(l+\frac{f}{2}-x)(r_1+g'+l+f)-(g+l+f)(l+\frac{f}{2}-x)>0$$

d'où l'on tire

$$x>\frac{(l+f)l-\left(r_1+g'+\frac{f}{2}\right)g-\left(r_1+g'\right)\frac{f}{2}}{r_1+g'+g+2(l+f)}$$

Alors

$$r=-W+\sqrt{W^2-WS+ST-TW}\qquad(8$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'un autre côté

$$\frac{d^2Q}{dx\,dr^2} = -\frac{4\,f\,E\,\gamma}{\rho}\,\frac{(W+r)(S+r)(T+r) - (r^2+2Wr+WS-ST+TW)(S+T+2r)}{(S+r)^3(T+r)^3}$$

qui, lorsque r a la valeur donnée par (8), se réduit à

$$\frac{-4\,f\,E\,\gamma}{\rho}\,\frac{W+r}{(S+r)^2(T+r)^2}$$

valeur essentiellement négative puisque r est toujours positif et que, x étant plus petit que l, W l'est toujours également. La seconde des équations (6) est donc également satisfaite par la valeur (8) de r et cette valeur correspond bien conséquemment à un maximum de $\frac{dQ}{dx}$.

La valeur W qui entre dans (8) supposant x déjà connu, on procède, en pratique, par approximations successives. Un premier essai donne une valeur approchée de x que l'on utilise pour calculer la valeur de r destinée à entrer dans l'essai définitif.

Lorsque la faute est au milieu de la ligne, de telle sorte que

$$x = \frac{l}{2}$$

on obtient les meilleurs résultats en prenant

$$r = -\frac{l+f}{2} + \sqrt{\frac{(l+f)^2}{4} + \left(r_1+g'\right)\left(g+\frac{l+f}{2}\right) + g\,\frac{l+f}{2}}$$

Lorsque

$$x < \frac{(l+f)\,l - \left(r_1+g'+\frac{f}{2}\right)g - \left(r_1+g'\right)\frac{f}{2}}{r_1+g'+g+2(l+f)}$$

il n'existe aucune valeur réelle de r correspondant à un maximum de $\frac{dQ}{dx}$. Mais, comme pour $r=o$, on a

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{2\,f\,E\,\gamma}{\rho}\,\frac{W}{S\,T}$$

valeur toujours positive, et pour $r=\infty$

$$\frac{dQ}{dx} = 0$$

on voit que $\frac{dQ}{dx}$ diminue à mesure que r augmente. On obtiendra donc la plus grande valeur de $\frac{dQ}{dx}$ en prenant $r=0$.

Causes d'erreur de la méthode. — La théorie que nous venons d'exposer suppose que la clef O passe *instantanément* de sa position de repos à celle de son contact avec le galvanomètre G et la terre. Pour réaliser ces conditions le mieux possible dans la pratique, il convient de ne donner que le moins de jeu possible à la clef O et de l'abaisser avec une très grande rapidité. La

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

partie de la charge qui échappe au galvanomètre G durant le mouvement de bascule du levier de la clef est d'autant plus considérable que f et r sont plus petits. Si donc

$$x < \frac{(l+f)\,l - \left(r_1 + g' + \frac{f}{2}\right) g - (r_1 + g')\,\frac{f}{2}}{r_1 + g' + g + 2\,(l+f)}$$

il sera préférable, au lieu de faire $r = 0$, ce qui donnerait la plus grande sensibilité, de prendre pour r une grande résistance, supérieure même peut-être à f, de manière à se rapprocher des conditions dans lesquelles la grandeur de la décharge à travers le galvanomètre G varie avec la distance de la faute.

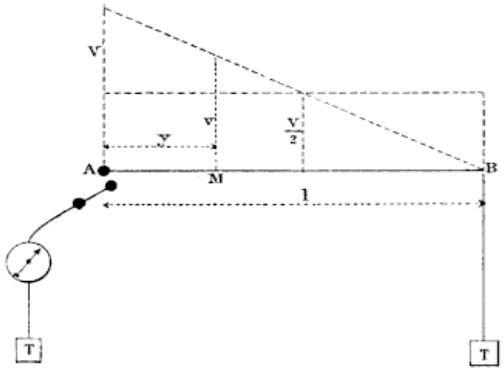


FIG. 373.

La self-induction dont nous n'avons pas tenu compte introduit dans les résultats d'autres erreurs ; toutefois ces erreurs ne deviennent sensibles que lorsque le câble est assez court. Pour avoir une idée de la limite de la longueur des câbles à partir de laquelle l'effet de la self-induction est pratiquement négligeable, remarquons que lorsqu'un câble chargé par une pile au potentiel V et mis à la terre à son extrémité éloignée est déchargé brusquement, 1/3 de la charge totale s'écoule à la terre par l'extrémité éloignée de la ligne et 2/3 par l'extrémité voisine [1]. La partie Q qui traverse le galvanomètre G est donc (fig. 373)

$$Q = \frac{2}{3}\,\gamma\,L\,\frac{V}{2} = \frac{1}{3}\,\gamma\,L^2\,\rho\,i$$

i représentant l'intensité du courant de décharge, et L la longueur de la ligne.

[1] v représentant en effet le potentiel d'un point quelconque M du câble, y et $l - y$ les résistances des deux sections de la ligne de part et d'autre du point M, la partie de la charge qui traverse le galvanomètre dont nous négligeons ici la résistance est

$$\int_0^l \gamma\,\frac{dy}{\rho}\,v \times \frac{l-y}{l}$$

ou, en remplaçant v par sa valeur tirée de la relation $\frac{v}{V} = \frac{l-y}{l}$

$$\frac{\gamma\,V}{\rho\,l}\int_0^l (l-y)^2\,dy = \frac{1}{3}\,\frac{\gamma\,V\,l}{\rho}$$

La charge totale de la ligne étant $\gamma\,\frac{l}{\rho}\,\frac{V}{2}$, la partie qui s'écoule à la terre par l'autre extrémité est

$$\frac{1}{6}\,\frac{\gamma\,V\,l}{\rho}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais si l'on désigne par λ le coefficient de self-induction de l'unité de longueur du câble et par q la quantité d'électricité développée par la self-induction pendant que le courant de décharge passe de i à 0

$$q = \lambda \, L \, \frac{i}{\rho \, L}$$

Par suite

$$\frac{q}{Q} = \frac{3 \, \lambda}{\gamma \, \rho^2 \, L^2}$$

D'après M. Vaschy, pour un circuit aérien en fils de bronze de 3 millimètres de diamètre comprenant l'aller et le retour, $\lambda = 0{,}0028$, $\gamma = 0{,}005 \times 10^{-6}$ et $\rho = 4$ ohms par kilomètre. Si l'on veut que $\frac{q}{Q} < \frac{1}{10}$, il faut que

$$\frac{3 \times 0{,}0028}{5 \times 10^{-9} \times 16 \times L^2} < \frac{1}{10}$$

On en tire approximativement

$$L > 1000 \text{ kilomètres}$$

Ce résultat peut être considéré comme à peu près indépendant, en pratique, de la distance des deux fils du circuit ; λ étant en effet une fonction de $\log \frac{d}{\delta}$, d représentant la distance des deux fils et δ leur diamètre, varie très peu même pour de grandes variations de d. La question est beaucoup plus complexe pour des câbles sous-marins dans lesquels l'enveloppe extérieure est formée de fils de fer, c'est-à-dire d'une gaine discontinue d'un métal magnétique.

§ 5. — DÉTERMINATION DE LA POSITION DE DEUX FAUTES EXISTANT SIMULTANÉMENT DANS UN CABLE

Lorsque deux fautes ne comprenant pas de rupture du conducteur existent simultanément dans un câble, l'application des méthodes précédentes ne donne que la position de la faute résultante. Le procédé suivant, dû à M. Hockin[1], bien qu'un peu compliqué, permet de les localiser séparément.

L'une des extrémités A (fig. 374) du câble est reliée par l'intermédiaire d'une clef de décharge à une pile et à un galvanomètre G. L'extrémité B étant isolée et en communication avec un électromètre, on mesure : 1° la résistance r du câble ; 2° le rapport n du potentiel n V du câble en B à celui V en A. A l'aide de la clef de décharge qui est munie d'un fort ressort, de telle sorte que le passage de l'une de ses positions à l'autre se fasse en une

[1] *Journal of the Society of telegraph Engineers and Electricians*, 1880, vol. IX, p. 217.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

très petite fraction de seconde, on met l'extremité A du câble en communication avec la terre par l'intermédiaire d'un second galvanomètre G_1 et

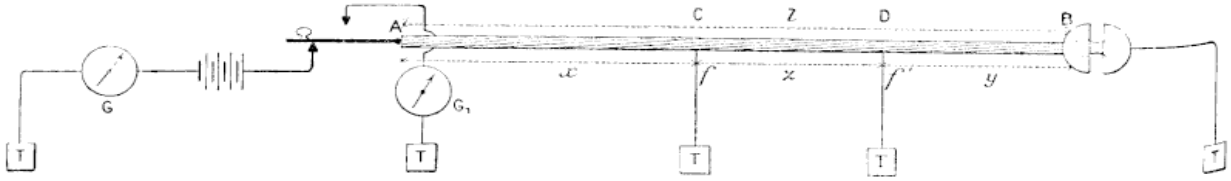


Fig. 374.

on mesure la décharge Q. On opère de la même manière en B et on obtient les quantités correspondantes r', n' et Q'.

Désignons maintenant par

x la résistance du conducteur de la portion du câble comprise entre l'extrémité A et la faute f,

y la résistance du conducteur de la portion de câble comprise entre l'extrémité B et la faute f',

z la résistance du conducteur de la portion de câble comprise entre les fautes f et f',

l la résistance totale du conducteur A B,

n la résistance d'une longueur de câble telle que, chargée au potentiel V, elle contienne une quantité d'électricité Q,

n' la résistance d'une longueur de câble telle que, chargée au potentiel V', elle contienne une quantité d'électricité Q'.

En partant des équations différentielles qui représentent la propagation de l'électricité dans un fil, on arrive aux deux équations

$$z = \frac{3\,(n - l\,n^2)\,r^2 - r^3 + 3\,r^2 n^2 x - (r - x)^3}{[r\,(1 - n) - x]\,[r\,(1 + 2\,n) - x]}$$

$$z = \frac{3\,(n' - l\,n'^2)\,r'^2 - r'^3 + 3\,r'^2\,n'^2\,y - (r' - y)^3}{[r'\,(1 - n') - y]\,[r'\,(1 + 2\,n') - y]}$$

qui jointes à

$$l = x + y + z$$

déterminent complètement les inconnues. L'élimination de deux d'entre elles conduisant à une équation du 7e degré, on calcule la valeur de x par une méthode d'approximations successives pour les détails de laquelle nous renvoyons au mémoire de M. Hockin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Résultats des essais électriques faits sur des câbles sous-marins, après leur immersion.

CABLE	Date.	Longueur en milles marins.	Conducteur en cuivre.		Diélectrique (G.P.)		Observations.
			Résistance par mille marin en ohms.	Conductibilité spécifique, celle du cuivre par étant égale à 100.	Résistance d'isolement par mille marin en megohms	Capacité électrostatique par mille marin en microfarads.	
Marseille — Alger.....	1871	499	11,587	97	56	0,348	Les valeurs des résistances sont ramenées à la température de 24° C.
Valentia — Heart's Content[1]..	1873	1876	3,167	94,1	254	0,353	
Lisbonne — Madère[1].....	1873	613	10,567	94	296	0,297	
Madère — Saint-Vincent[1]...	1874	1196	10,436	95,2	285	0,297	
Jamaïque — Porto-Rico[1]...	1874	647	11,535	96,7	274	0,306	
St-Vincent — Pernambouc[1]..	1874	1844	4,836	96,7	312	0,302	
Valentia — Heart's Content..	1874	1837	3,135	95,1	282	0,332	
Italie — Sardaigne[1].....	1875	118	12,024	92,7	373	0,296	
Botany-Bay — Nelson[1].....	1876	1282	11,708	95,2	273	0,300	
Suez — Aden[1].....	1876	1443	10,180	97,6	333	0,301	
Aden — Bombay[1].....	1877	1888	6,800	97,4	344	0,314	
Penang — Rangoon[1].....	1877	853	11,561	96,4	341	0,308	
Marseille — Bône[1].....	1877	463	11,738	94,9	590	0,315	
Bône — Malte[1].....	1877	382	11.644	95,7	618	0,302	
Antibes — Saint-Florent.....	1878	152	11,848	91	1098	0,281	
Delagoa — Mozambique[1]....	1879	966	11,693	95,3	438	0,284	
Mozambique — Zanzibar[1]...	1879	631	11.634	95,8	391	0,282	
Singapore — Java[1].....	1879	919	11,576	96.3	378	0,282	
Aden — Zanzibar[1].....	1879	1908	4,935	96,7	296	0,314	
Marseille — Alger.....	1879	495	11,386	97,8	1062	0,293	
Marseille — Alger.....	1880	488	11,239	99,6	1923	0,282	
Banjoewangi—Port Darwin[1].	1880	1131	11,644	95,7	345	0,282	
Placentia — Saint-Pierre[1]...	1880	109	11,442	97,4	517	0,282	Câble à 3 conducteurs.
			11,414	97,6	494	0,282	
			11,446	97,4	502	0,282	
Valentia — Heart's Content[1].	1880	1423	4,161	95,5	478	0,315	
Singapore — Batavia[1].....	1881	537	11,297	98,7	709	0,316	
Valentia — Greitseil[1].....	1882	841	9,098	100.0	567	0,354	

[1] Rankine's *Rules and Tables*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CINQUIÈME PARTIE

EXPLOITATION DES LIGNES SOUS-MARINES

Le nombre des conducteurs sous-marins qui unissent deux points du globe étant toujours très restreint, par suite des dépenses considérables qu'entraîne ce genre de communications, tant pour leur établissement que pour leur entretien, on a été conduit de très bonne heure à rechercher, d'une part les diamètres les plus avantageux à donner au conducteur et à l'enveloppe isolante, dans les limites compatibles avec une entreprise industrielle, d'autre part les appareils de transmission les plus propres à faire produire aux câbles leur rendement maximum.

La solution de ces deux questions était liée au problème de la propagation de l'électricité dans un conducteur cylindrique avant qu'un régime permanent ne soit établi. G. S. Ohm avait établi, dès 1827, dans son célèbre *Traité sur la théorie mathématique du circuit galvanique* [1], l'équation différentielle correspondante et avait signalé son analogie avec l'équation trouvée par Fourier pour la propagation de la chaleur dans une barre indéfinie. Mais la télégraphie électrique qui aurait pu tirer d'utiles applications de ces données ne devait naître qu'une dizaine d'années plus tard et les travaux d'Ohm restèrent presque inconnus pendant longtemps. En 1856, sir W. Thomson, s'inspirant d'idées théoriques différentes de celles d'Ohm, assimila directement la propagation d'un flux d'électricité dans un conducteur très long relativement à sa section, à celle d'un flux de chaleur dans une barre indéfinie. Les résultats auxquels il fut conduit sont d'autant plus voisins de la vérité que les manifestations de l'état variable se font plus lentement : ils sont rigoureusement exacts pour les corps très résistants comme des fils de coton, des colonnes d'huile, etc., et représentent, d'une manière encore suffisamment approchée pour les besoins de la pratique, les phénomènes dans les câbles sous-marins.

[1] Traduction de M. Gaugain, Paris, 1860.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XV

THÉORIE DE LA TRANSMISSION DES SIGNAUX DANS LES CABLES SOUS-MARINS

§ 1er. Propagation du flux électrique dans un conducteur cylindrique limité pendant la période variable. — Signaux bridés. — Emploi de condensateurs intercalés entre la ligne et les appareils de réception ou de transmission. — Alphabets.
Application au câble atlantique français de 1869.
§ 2. Vitesse de transmission des signaux. — Vitesse absolue de l'électricité.

§ 1er. — PROPAGATION DU FLUX ÉLECTRIQUE DANS UN CONDUCTEUR CYLINDRIQUE LIMITÉ PENDANT LA PÉRIODE VARIABLE

Soit (fig. 375) un câble mis à la terre à son extrémité B et relié en A à une pile dont l'autre pôle est également à la terre. Considérons dans ce

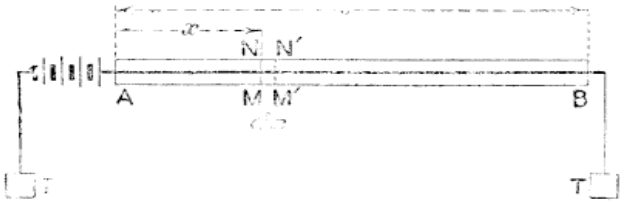


Fig. 375.

câble l'élément de volume de longueur dx compris entre deux sections M N et M' N' normales à l'axe et situées aux distances A M $= x$ et A M' $= x + dx$ de l'origine A et désignons par

V_0 le potentiel en A,
V le potentiel en M et au temps t,
I_0 l'intensité du courant en A au même instant,
I — M —
I_1 — B —
ρ la résistance du conducteur par unité de longueur, γ la capacité élec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trostatique de l'âme par unité de longueur.

R la résistance du diélectrique par unité de longueur,

l la longueur A B de la ligne.

Le potentiel et l'intensité du courant au temps t, dans la section M' N', seront $V + dV$ et $I + dI$.

La quantité d'électricité $I\,dt$ qui pendant le temps dt traverse la section M N, se partagera en trois parties : la première se propagera le long du conducteur et traversera la section M' N' ; elle est représentée par $(I + dI)\,dt$; la seconde traversera l'enveloppe isolante de l'élément M N M' N' dont la résistance est $\frac{R}{dx}$; elle est égale à

$$\frac{V}{\frac{R}{dx}}\,dt$$

la troisième augmentera la charge électrostatique de l'élément et est exprimée par $\gamma\,dx\,\frac{dV}{dt}\,dt$.

On aura donc

$$I\,dt = (I + dI)\,dt + \frac{V\,dx}{R}\,dt + \gamma\,\frac{dV}{dt}\,dx\,dt \quad .$$

Réduisant et remarquant que d'après la loi d'Ohm

$$I = -\frac{dV}{\rho\,dx} \tag{1}$$

d'où

$$dI = -\frac{1}{\rho}\,\frac{d^2V}{dx^2}\,dx$$

il vient

$$\frac{1}{\rho}\,\frac{d^2V}{dx^2} - \gamma\,\frac{dV}{dt} - \frac{1}{R}\,V = 0$$

ou, en posant

$$\gamma\,\rho = \alpha^2 \tag{2}$$

et

$$\frac{\rho}{R} = \beta^2 \tag{3}$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} - \alpha^2\,\frac{dV}{dt} - \beta^2\,V = 0 \tag{4}$$

L'intégrale générale de cette équation a été donnée par Fourier et est représentée par

$$\frac{V}{V_0} = \frac{e^{\beta(l-x)} - e^{-\beta(l-x)}}{e^{\beta l} - e^{-\beta l}} - 2\pi\,e^{-\frac{t}{\gamma R}} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{n}{n^2\pi^2 + \beta^2 l^2}\,e^{-\frac{n^2\pi^2}{\alpha^2 l^2}\,t} \sin\frac{n\pi}{l}\,x$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Généralement, ρ ne dépasse pas 10 ou 12 ohms et R atteint 8 à 10 000 meghoms ; β^2 est donc inférieur à $\frac{1}{10^9}$. Si on le considère comme nul, ce qui revient à faire $R = \infty$, ou à négliger la déperdition d'électricité par l'enveloppe, l'intégrale ci-dessus se simplifie et devient

$$\frac{V}{V_0} = \frac{l - x}{l} - 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n\pi} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{\alpha^2 l^2} t} \sin \frac{n\pi}{l} x \tag{5}$$

Différentiant par rapport à x et portant la valeur obtenue pour $\frac{dV}{dx}$ dans l'équation (1), on a pour l'intensité du courant à la distance x

$$I = \frac{V_0}{\rho l} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{\alpha^2 l^2} t} \cos \frac{n\pi}{l} x\right)$$

A l'extrémité B du fil qui communique avec le sol, $x = l$; sin $n\pi$ étant toujours nul, le potentiel est égal à 0 et l'intensité I_1 du courant est

$$I_1 = \frac{V_0}{\rho l} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{n=\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{\alpha^2 l^2} t} \cos n\pi\right) \tag{6}$$

En donnant à n les valeurs consécutives 1, 2, 3... le cosinus prend alternativement des valeurs égales à -1 et $+1$. Si donc, on pose pour abréger

$$e^{-\frac{\pi^2}{\alpha^2 l^2} t} = u \tag{7}$$

l'équation (6) devient

$$I_1 = \frac{V_0}{\rho l} \left[1 - 2 (u - u^4 + u^9 - u^{16} + u^{25} - \ldots.)\right] = F(t) \tag{8}$$

Pour des valeurs de t extrêmement petites, u tend vers l'unité ; à la limite, la série $u - u^4 + u^9 \ldots$ est égale à $\frac{1}{2}$ et l'intensité du courant est nulle. A mesure que le temps augmente, u diminue, la série décroît et le courant augmente ; mais, d'après sir W. Thomson, la série ne diffère d'une manière appréciable de sa valeur minimum $\frac{1}{2}$ que lorsque

$$u > \frac{3}{4}$$

En appelant τ le temps auquel cette valeur est atteinte, on a

$$e^{-\frac{\pi^2 \tau}{\alpha^2 l^2}} = \frac{3}{4} \tag{9}$$

d'où

$$\tau = \frac{\alpha^2 l^2}{\pi^2} \log_e \frac{4}{3} \tag{10}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

τ étant exprimé en secondes si α et l sont exprimés en unités du système C. G. S. [1], ou

$$\tau = \frac{\gamma \rho l^2}{10^6} \times 0{,}02915 \text{ secondes} \qquad (11)$$

γ représentant la capacité électrostatique du câble par mille marin en microfarads, ρ la résistance du conducteur par mille en ohms et l sa longueur en milles, ou encore

$$\tau = \frac{r\,C}{10^6} \times 0{,}02915 \text{ secondes} \qquad (12)$$

r représentant la résistance totale du conducteur en ohms et C la capacité totale de la ligne en microfarads.

A partir de ce moment, la série tend vers 0 et I_1 croît jusqu'à sa valeur limite $\frac{V_0}{\rho l}$ qu'il n'atteint qu'au bout d'un temps infiniment grand.

La courbe I (fig. 376) est la *courbe d'arrivée* du courant dans un câble dont une extrémité est à la terre et l'autre reliée à une source électrique

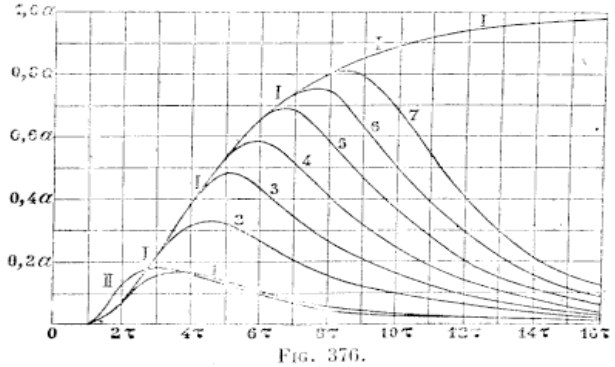


FIG. 376.

de potentiel constant. Les temps sont comptés sur l'axe des x, chacune des divisions portées sur cet axe correspondant à un temps égal à τ. Les intensités du courant sont comptées sur l'axe des y, l'intensité maximum $\frac{V_0}{\rho l} = a$ étant prise pour unité et divisée en dix parties égales. On voit que la courbe ne se détache de l'axe des x qu'après le temps τ et qu'elle a pour asymptote la droite parallèle à cet axe située à la distance a de l'origine O : le courant arrive aux 9/10 environ de sa valeur limite au bout du temps 10 τ. Deux câbles semblables qui ne diffèrent entre eux que par leurs longueurs, atteignant dans le même temps la même fraction de leur charge limite, on peut dire pratiquement, d'après la relation (10), que les temps nécessaires pour charger des câbles semblables, mais de longueurs différentes, sont proportionnels aux carrés de leurs longueurs.

L'équation (5) permet de construire les courbes du potentiel le long d'un câble à différents temps $\frac{\tau}{2}$, τ, 2 τ, 3 τ... de la période variable ; O X

[1] Un ohm est égal à 10^9 unités électro-magnétiques absolues de résistance; un microfarad est égal à $\frac{1}{10^{15}}$ unités électro-magnétiques absolues de capacité.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 377) représente la longueur du câble, O Y la force électromotrice V,

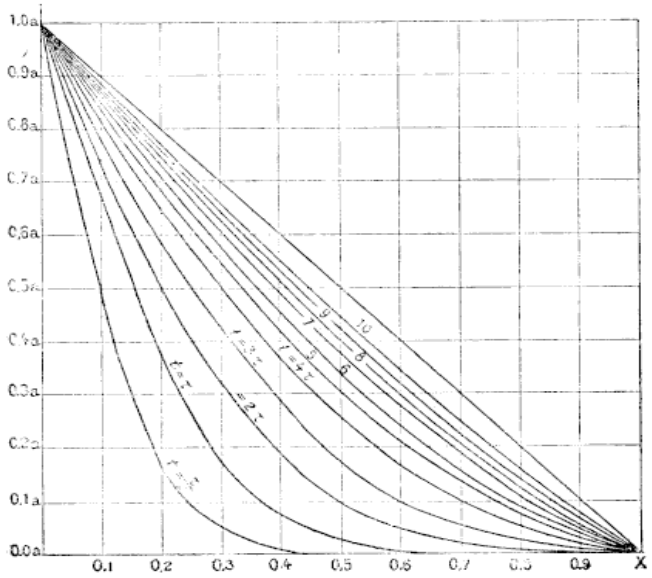


FIG. 377.

de la pile. Les courbes tendent vers la ligne droite X Y avec laquelle elles ne se confondent qu'après un temps infiniment grand.

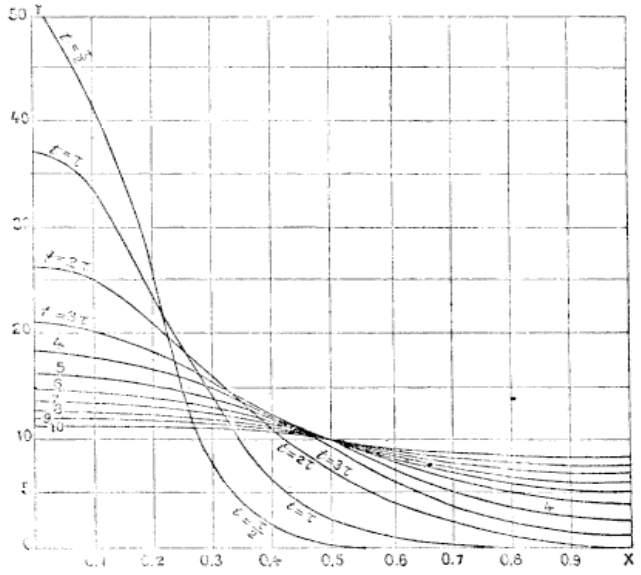


FIG. 378.

La figure 378 donne de même les intensités du courant le long du câble aux mêmes temps. On voit qu'au milieu de la ligne cette intensité est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

encore presque nulle au bout du temps $\frac{1}{2}\tau$ (intersection de l'ordonnée 0,5 avec la courbe $t = \frac{1}{2}\tau$), mais qu'elle croît très rapidement à partir de ce moment. Elle y atteint la valeur maximum a au bout d'un temps compris entre 3τ et 4τ ; toutes les courbes se coupent en ce point, l'intensité du courant diminuant à partir de ce moment dans la première moitié du câble et augmentant dans la seconde moitié.

Si l'on ne fait communiquer en A (fig. 375) le câble avec la pile que pendant un temps très court t_1 et qu'on le relie ensuite directement à la terre, la charge électrique s'écoulera aux deux extrémités de la ligne. On peut obtenir l'intensité du courant, à un instant quelconque, à l'extrémité B, en superposant deux états, le premier dû au potentiel V_0 établi en A à l'origine du temps, le second au potentiel $-V_0$ établi en A au temps $t - t_1$; on calculera donc l'expression

$$I_{t_1} = F(t) - F(t - t_1)$$

dans laquelle on considérera comme nulles toutes les valeurs de la fonction F correspondant à des valeurs négatives du temps.

Graphiquement, ceci revient à prendre la différence des ordonnées de la courbe I (fig. 376) et d'une autre courbe identique qu'on aurait fait glisser vers la droite de la longueur t_1. Les courbes 1 à 7, correspondant à des contacts dont les durées sont respectivement de τ, 2τ, 3τ..., 7τ, ont été tracées de cette manière. Le résultat définitif est une sorte d'*onde électrique* qui se propage tout le long de la ligne.

Si la durée θ du contact était infiniment petite, la courbe d'arrivée de l'intensité du courant serait représentée par l'équation

$$i = \theta \frac{dF}{dt} = \theta \frac{dF}{du}\frac{du}{dt}$$

ou, en se reportant aux équations (7) et (8),

$$i = \theta \frac{2 V_0}{\rho l} \frac{\pi^2}{\alpha^2 l^2} \left(u - 4u^4 + 9u^9 - 16u^{16} + \dots\right) \qquad (13)$$

Cette intensité est représentée par la courbe II (fig. 376) ; elle est maximum lorsque $\frac{di}{dt} = 0$, c'est-à-dire lorsque

$$u - 16u^4 + 81u^9 - \dots = 0$$

qui correspond sensiblement à

$$u = \left(\frac{3}{4}\right)^3$$

ou, par suite des relations (7) et (9), à

$$t = 3\tau$$

Au lieu de mettre le câble à la terre, après un contact d'une durée t_1 avec le pôle positif de la pile, on peut le relier ensuite au pôle négatif d'une pile

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

semblable ou non. Les ordonnées de la nouvelle courbe d'arrivée du courant se calculeront, si la pile a en valeur absolue le même potentiel — V_0, en

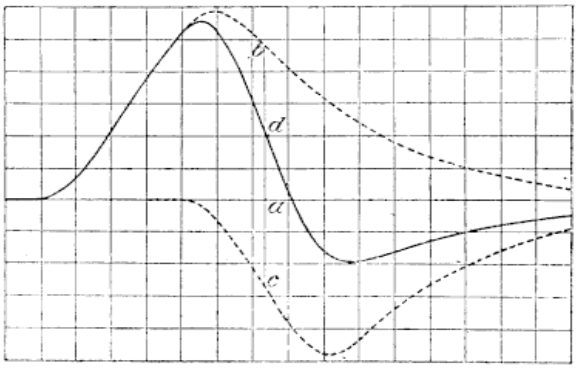


Fig. 379.

ajoutant algébriquement l'expression $-F(t-t_1)$ à celle $F(t)-F(t-t_1)$, soit par

$$F(t)-2F(t-t_1)$$

Si le contact avec le pôle négatif ne dure qu'un temps t_2 et que le câble soit mis ensuite à la terre au départ, la courbe définitive du courant est représentée par

$$F(t)-2F(t-t_1)+F(t-t_1-t_2)$$

Si, par exemple, le premier contact a duré un temps 4τ, le second 3τ avec une pile dont le potentiel est — V_0, et si le câble est mis à la terre

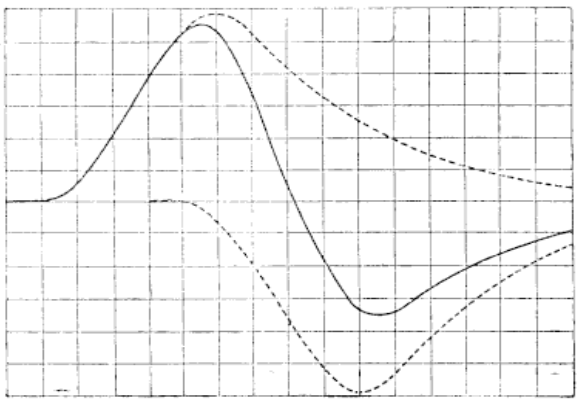


Fig. 380

ensuite, on fera glisser la courbe 3 de la figure 376, renversée, vers la droite, jusqu'à l'abscisse 4τ et on diminuera chaque ordonnée de la courbe 4, en partant de la courbe, de la longueur de l'ordonnée correspondante de la courbe 3. Ainsi, l'ordonnée $a\,d$ (fig. 379) est égale à l'ordonnée $a\,b$, moins

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

b d égal à l'ordonnée *a c*. L'onde électrique sera dans ce cas représentée par la courbe tracée en trait plein.

On procède d'une manière analogue si le second contact négatif est suivi

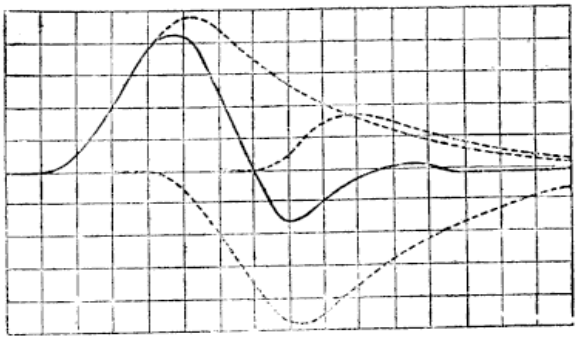


Fig. 381.

d'un troisième positif, et ainsi de suite. Les courbes à trait plein des figures 380, 381, 382 représentent les ondes d'arrivée dues aux contacts alternatifs indiqués ci-après, avec mise à la terre immédiatement après.

Courbes.	Durée des contacts.			
	+	—	+	-
Figure 380.	4 τ	4 τ		
Figure 381.	3 τ	3 τ	τ	
Figure 382.		τ	4τ	2τ

Le câble se trouve alors divisé en sections contenant des charges électriques alternativement positives et négatives qui finissent par pénétrer les

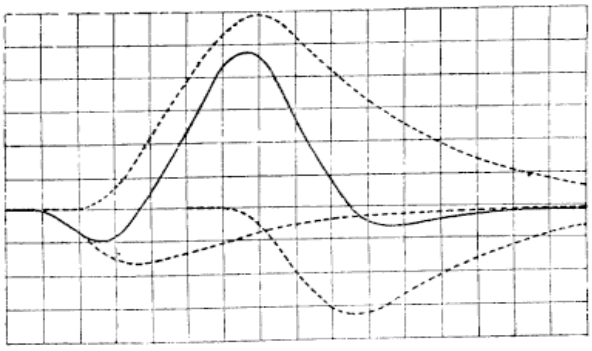


Fig. 382.

unes dans les autres, de telle sorte que, si la durée des contacts est convenablement choisie, l'onde électrique est beaucoup plus courte que si l'on n'avait fait qu'un contact unique. Le câble est ainsi ramené plus rapidement à l'état neutre, après le passage de l'onde, et les signaux peuvent conséquemment se succéder à des intervalles de temps plus rapprochés. Les signaux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui sont obtenus par une succession de trois à cinq contacts alternatifs très courts, sont dits *bridés* en télégraphie sous-marine, ces courants ayant pour effet de donner à la courbe d'arrivée, de part et d'autre du maximum, une inclinaison beaucoup plus accentuée.

INTERCALATION DE CONDENSATEURS SUR LES CABLES SOUS-MARINS

On obtient des signaux analogues aux signaux bridés et on soustrait en même temps les lignes sous-marines aux effets des courants telluriques, en les séparant à chacune de leurs extrémités, par des condensateurs, des appareils de réception ou de transmission : les câbles restent ainsi complètement isolés. Si une pile (fig. 383) communique, à un instant déterminé, une charge d'électricité positive à l'armature n° 1 de l'un C de ces condensateurs, une quantité égale d'électricité neutre est décomposée sur l'arma-

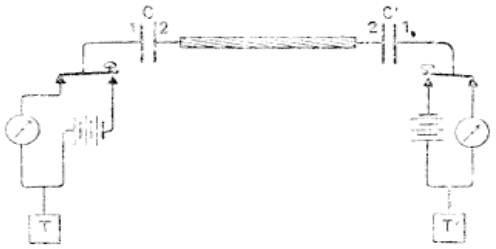


Fig. 383.

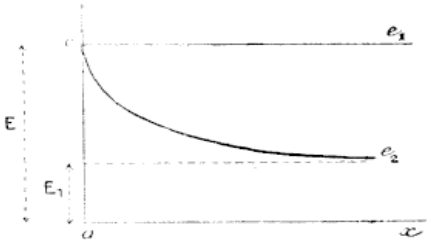


Fig. 384.

ture 2 : l'électricité négative reste attirée par celle de nom contraire de l'armature 1, et l'électricité positive mise en liberté se répand dans le câble et sur l'armature 2 du condensateur C'. Cette dernière décompose, sur l'armature 1 de C', une quantité d'électricité neutre égale à la sienne : l'électricité négative reste attirée vers l'armature 2 et l'électricité positive, de même polarité par conséquent que celle fournie par la pile, est repoussée dans le sol, à travers les appareils de réception. Dès que le contact cesse, l'électricité positive répandue sur l'armature n° 1 du condensateur C s'écoule à la terre en T ; l'électricité négative que contenait l'armature n° 2 du même condensateur devient libre et se recombine avec l'électricité positive disséminée dans le câble et sur l'armature n° 2 de C' ; enfin, l'électricité négative de l'armature n° 1 de C', libre à son tour, se rend à la terre en T' et le câble se retrouve à l'état neutre.

Pendant la période de charge du condensateur C, son armature 1 se trouve au potentiel constant $e\ o$ (fig. 384) égal à la force électromotrice E de la pile de transmission ; il est donc représenté par la ligne droite $e\ e_1$. Le potentiel de l'armature 2, en contact avec le câble, décroît, au contraire, de E à une certaine valeur E_1 qu'il n'atteindrait théoriquement qu'au bout d'un temps infini, lorsque le régime permanent serait établi : les différentes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

valeurs de ce potentiel, pendant la même période de temps, seraient représentées par les ordonnées d'une courbe telle que $e\ e_2$, ayant pour asymptote une droite parallèle à l'axe $o\ x$ des temps et située à la distance E_1 de cet axe. L'introduction du condensateur C dans le circuit produit donc, pendant la période de charge, le même effet qu'une force électromotrice croissant de o à $E - E_1$, de sens contraire à celle de la pile de transmission et placée à l'origine du câble. La période de décharge donnant lieu à des phénomènes semblables, les ordonnées de la courbe d'arrivée du courant sont, immédiatement après que le contact avec la pile est établi ou rompu, diminuées dans une proportion de plus en plus considérable, à mesure que le temps augmente. On conçoit dès lors que les contours de la courbe d'arrivée soient plus raides dans ces conditions que lorsque le câble est mis directement en relation avec la pile, et analogues, au contraire, à ceux que l'on obtient par l'envoi successif de courants alternés à potentiels décroissants.

L'augmentation de vitesse que l'on a obtenue par l'emploi de condensateurs aux deux extrémités du câble de Brest à Saint-Pierre a été, en fait, de 33 p. 100.

L'emploi de condensateurs, tout en nécessitant des piles plus fortes, permet de ne charger, en réalité, les câbles, sauf à leurs extrémités, qu'à un potentiel inférieur à celui qu'ils auraient, s'ils étaient mis directement en communication avec une pile. Si une pile d'une force électromotrice de 10 volts, par exemple, est nécessaire pour faire fonctionner l'appareil récepteur sur un câble de 1 000 microfarads de capacité, l'expérience prouve qu'en plaçant des condensateurs de 100 microfarads à chaque extrémité du câble, une pile de 25 à 30 volts suffit pour assurer la transmission des signaux. Or, il est facile de calculer approximativement, dans chacun de ces deux cas, la valeur moyenne du potentiel dans une section déterminée du conducteur, soit, pour fixer les idées, dans celle qui, placée à ce point de vue dans les conditions les plus défavorables, aboutit au poste de départ et dont la longueur serait 1/10 de la longueur totale du câble, par exemple. Si la pile est en contact immédiat avec le câble et si celui-ci est à la terre à l'extrémité éloignée, la ligne représentative des potentiels, en négligeant la déperdition de l'électricité par l'enveloppe isolante, est une simple ligne droite dont les ordonnées extrèmes, sur la section de ligne considérée, sont E et 9/10 E, E désignant la force électromotrice de la pile : le potentiel moyen y sera donc 95/100 E. Lorsque le câble est isolé par deux condensateurs, la force électromotrice de la pile devenant 3 E, si Q représente la charge que prend chaque armature du condensateur C et V_1 le potentiel général du câble, à la fin de la période de charge, on aura

$$Q = (3\,E - V_1)\,100 = V_1\,(1000 + 100)$$

d'où

$$V_1 = \frac{1}{4}\,E$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sur l'armature n° 2 et dans les parties du câble qui en sont les plus voisines, le potentiel décroîtra donc, dans les premiers instants qui suivront un contact, de 3 E à $\frac{1}{4}$ E ; il acquerra par suite rapidement, et en des points relativement peu éloignés de l'origine, une valeur bien inférieure à celle qu'il avait dans le cas précédent.

Il est d'ailleurs aisé de se rendre compte de la manière dont agissent les condensateurs pour rendre les appareils de réception à peu près insensibles à l'action des courants telluriques. Ces courants ne se développant jamais très brusquement, sauf durant les orages magnétiques, supposons que l'un de ces courants ait un potentiel de 100 volts, c'est-à-dire que son potentiel croisse de 0 à 100 volts dans l'espace de cinq minutes ou trois cents secondes ; admettons, en outre, que la résistance du câble dans lequel circule ce courant soit de 7 500 ohms, sa capacité C de 1 000 microfarads, et celle γ de chacun des condensateurs placés à ses deux extrémités de 100 microfarads. Ainsi que nous le verrons un peu plus loin, dans ces conditions, τ est sensiblement égal à 0s,24 et pour un double contact d'une durée de 2,9 τ = 0s,69, l'amplitude de la variation du courant à l'arrivée est les 0,0269 de l'intensité limite de ce courant.

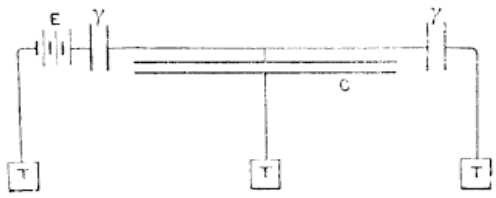


Fig. 385.

E désignant la force électromotrice appliquée à la première armature de l'un des condensateurs (fig. 385), et V le potentiel que prend le câble, on aura

$$\gamma\,(E - V) = (C + \gamma)\,V$$

La charge du condensateur à la station d'arrivée sera donc

$$\gamma\,V = \frac{\gamma^2}{C + 2\,\gamma}\,E$$

Dans le cas particulier que nous considérons, la force électromotrice du courant terrestre variant de 1/3 de volt par seconde, la charge du condensateur, à l'arrivée, augmente donc dans le même temps de

$$\frac{100 \times 100}{1\,000 + 200} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{10^6} = \frac{1}{360\,000}\ \text{ampère}$$

La charge de ce même condensateur, pour une pile de transmission de 30 volts donnant la même intensité maximum de courant à l'arrivée qu'une pile de 10 volts appliquée directement au câble, varie, par seconde, de

$$0{,}0269 \times \frac{10}{7500} = \frac{1}{30\,000}\ \text{ampère}$$

La vitesse de charge sera donc, dans le second cas, environ 12 fois plus

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

grande que dans le premier. Avec des condensateurs, la lecture des signaux sera, par suite, aussi facile que si le courant tellurique n'existait pas, surtout si, au lieu d'une échelle divisée, on se sert, à la station d'arrivée, d'une simple bande de papier blanc et d'un zéro fictif.

La quantité d'électricité qui entre dans un câble séparé de la pile par des condensateurs de capacités variables, lorsque la durée des contacts avec la source électrique reste constante, augmente avec la capacité des condensa-

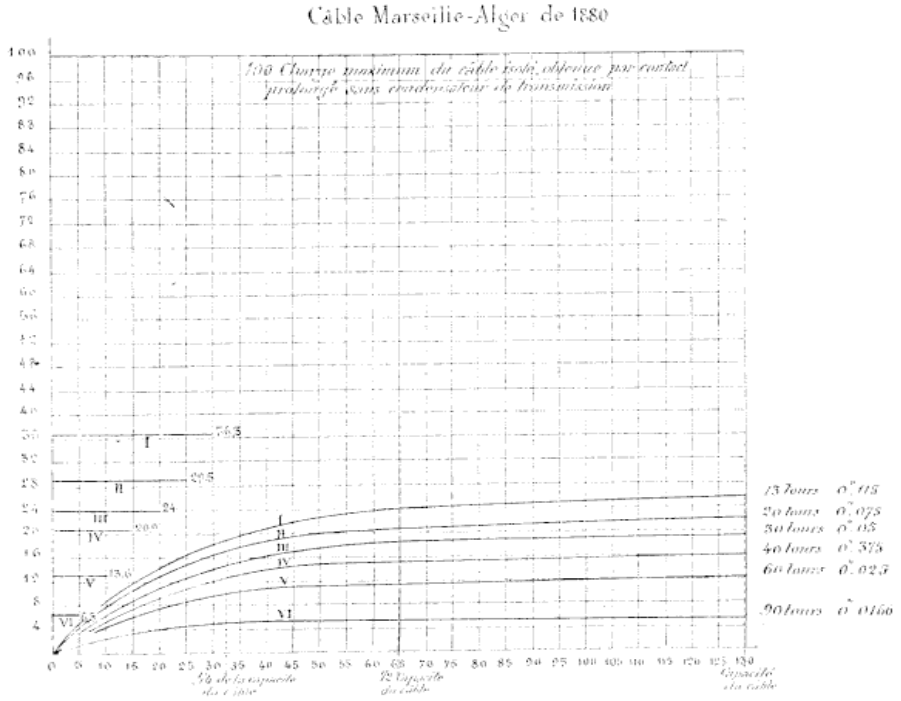


FIG. 386.

teurs interposés, sans pouvoir dépasser la charge que prendrait le câble, dans les mêmes conditions, s'il était relié directement à la pile. On s'en rend compte facilement si, reprenant les notations ci-dessus et désignant par V le potentiel de la seconde armature du condensateur, à un instant déterminé pendant la période de charge, par V′ le potentiel *moyen* du câble au même instant, on remarque que l'on a toujours

$$\gamma\,(E - V) = C\,V'$$

V′ ayant en effet pour limite le potentiel *moyen* V_1 que prend, au bout du même temps de charge, le câble lorsqu'il est relié directement à la pile, $\gamma\,(E - V)$ a lui-même pour limite, quel que soit γ, $C\,V_1$.

Des expériences faites récemment par M. Belz sur diverses lignes souterraines et sous-marines aboutissant au bureau de Marseille confirment ces

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conclusions : les résultats obtenus sur le câble Marseille-Alger de 1880 sont résumés graphiquement dans la figure 386. Les ordonnées représentent les charges qui entrent dans le câble, ces charges étant rapportées à celle prise égale à 100 qui correspond à un contact prolongé avec la pile ; les capacités des condensateurs sont comptées sur l'axe de x. Les contacts étaient produits à l'aide d'un transmetteur automatique de Wheatstone ; leur durée s'étendait de 0″,0166 à 0″,115 correspondant à des vitesses de rotation variant de 150 à 13 tours par minute. La pile employée comprenait 20 éléments Callaud.

On voit que chaque courbe représentative des charges a pour asymptote la droite, parallèle à l'axe des x, qui correspond à la charge du câble, lorsqu'il est relié directement à la pile, pour la même durée de contact. Avec un condensateur de 35 microfarads, capacité égale au 1/4 de celle du câble, la charge envoyée dans la ligne après un contact de 0″,05 n'est plus que les 0,45 environ de la charge maximum, ou celle que l'on obtiendrait sans condensateurs après un contact prolongé avec une pile de $\frac{20 \times 45}{100} = 3$ éléments Callaud. La plus forte charge, pour cette durée de contact, égale aux 0,24 de la charge maximum, serait obtenue sans condensateurs après un contact prolongé avec 4,8 éléments Callaud.

M. Belz a reconnu en outre que si la durée des contacts est suffisamment courte par rapport à la longueur de la ligne, les charges qui y entrent, toutes autres choses égales, ont les mêmes valeurs lorsque l'extrémité éloignée du conducteur est isolée ou à la terre. La théorie que nous avons exposée plus haut donne immédiatement l'explication de ce fait. Pour le câble Marseille-Alger de 1880, τ étant en effet égal à 0″,0208, le temps 0″,05, par exemple, correspond à 2,4 τ environ. Or on a vu qu'au bout du temps τ l'intensité du courant, à l'arrivée, est pratiquement nulle et qu'elle est encore très faible au bout du temps 2,4 τ. La quantité d'électricité qui, au départ, pénètre dans le câble pendant ce temps doit, par suite, rester sensiblement la même, quel que soit l'état du conducteur à l'extrémité opposée.

Les condensateurs permettent en outre, ainsi qu'on l'a vu dans la quatrième partie, de prolonger l'existence d'un câble fautif, en maintenant la faute à un potentiel négatif permanent qui empêche la corrosion du conducteur en cuivre.

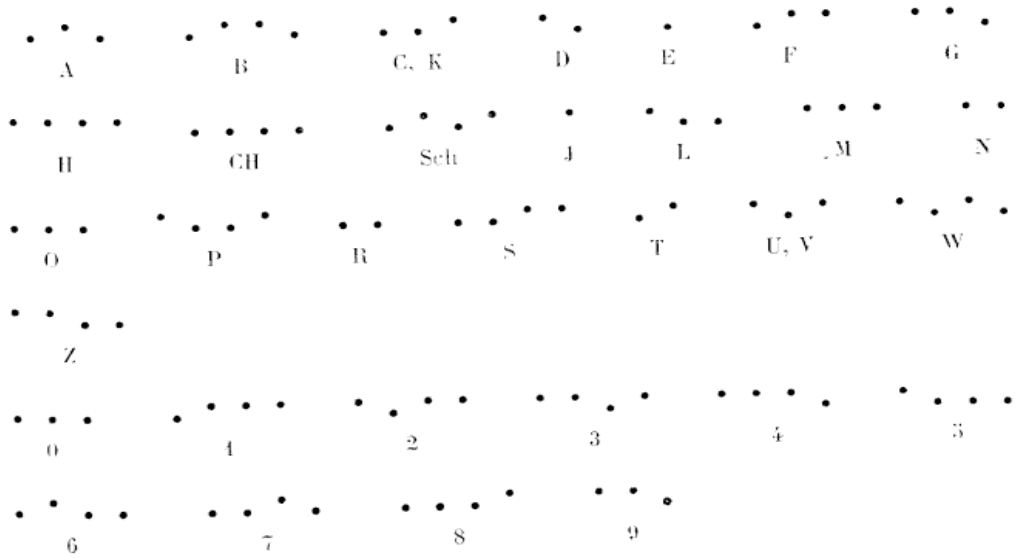
Aussi l'emploi de condensateurs sur les câbles est-il devenu presque universel. Des clefs ou manipulateurs donnant automatiquement la succession de courants alternatifs et à potentiels décroissants nécessaire pour produire des signaux bridés ont été imaginés à diverses reprises par sir W. Thomson, le professeur Fleeming Jenkin, MM. Varley et Siemens. Malgré les avantages que paraît devoir présenter ce système, les essais qui en ont été faits sur de très grands câbles déjà isolés par des condensateurs n'ont jamais

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

paru assez satisfaisants pour décider les Compagnies à adopter l'un des modèles présentés.

ALPHABETS

L'alphabet le plus communément employé sur les lignes sous-marines est, en faisant abstraction des caractères typographiques, l'alphabet Morse ordinaire composé de points et de traits ou interprété comme dans les anciens appareils Wheatstone à une aiguille, les déviations vers la droite ou les points placés au haut d'une bande de papier correspondant aux points, les déviations vers la gauche ou les points placés au bas de la bande correspondant aux traits de l'alphabet ordinaire. Le premier ne nécessite que des courants d'un seul sens, le second exige des courants de sens opposés. Ce dernier système d'écriture est dû à Steinheil, bien que son alphabet que nous reproduisons ci-après à titre de document historique n'ait jamais été adopté.



Les alphabets composés uniquement de points ont l'avantage d'éviter l'émission de courants de durées différentes : le câble, après la formation de chaque signal élémentaire, ne se trouve pas néanmoins dans les mêmes conditions électriques.

A l'arrivée, les signaux dépendent nécessairement et dans une large mesure de ceux qui les ont précédés. Les lettres *e*, *i*, *s*, *h*, par exemple, de l'alphabet Morse, formées uniquement d'émissions de courant d'un seul sens,

. , . . . , ... , ...

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

donnent des courants d'intensités croissantes et par suite des déviations au galvanomètre récepteur de plus en plus considérables. La même observation s'applique évidemment aux lettres *t*, *m*, *o*, etc., formées de la même manière exclusivement par des émissions de courants de sens contraire. La courbe d'arrivée du courant correspondant à l'émission d'une série de courants du

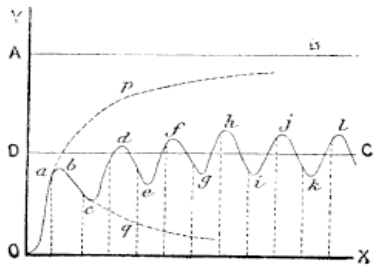


Fig. 387.

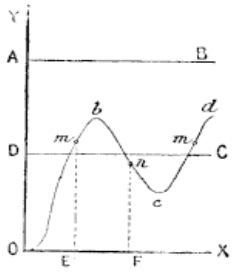


Fig. 388.

même sens, séparés par des intervalles égaux à leur durée même, est représentée (fig. 387) par une ligne ondulée dont l'axe, au bout de très peu de temps, est parallèle à l'axe des x et situé à la hauteur $\frac{1}{2}\frac{V_0}{\rho l}$; l'intensité moyenne du courant à l'arrivée est donc rapidement égale à la moitié de l'intensité limite. L'amplitude de ces ondulations diminue d'ailleurs à mesure que la durée des contacts alternatifs devient plus courte ainsi qu'il résulte du tableau ci-dessous [1].

Durée d'un double contact, en fonction de $\tau = 1$. . .	2,9	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10
Amplitude de la variation du courant, à l'arrivée, le courant limite étant pris = 100.	2,69	2,97	4,52	6,31	10,42	14,85	19,67	24,42	29,11	33,68

Si m E et n F (fig. 388) représentent les intensités du courant pour lesquelles l'appareil récepteur commence et cesse de fonctionner, son jeu ne sera régulier que si ces deux limites d'intensité tombent de part et d'autre de la ligne médiane D C. C'est la différence de niveau de ces deux points m et n qui constitue la période de sensibilité des divers appareils : s'ils étaient tous deux au-dessous de D C, on aurait des signaux longs, séparés par des intervalles plus courts ; s'ils étaient tous deux au-dessus de D C, on aurait des signaux courts séparés par de longs intervalles. Si le point n était au-dessous des sommets inférieurs c..., on recevrait un signal continu ; enfin si le point m était au-dessus des sommets supérieurs b, d..., on ne recevrait rien. Les lettres dans lesquelles les points et les traits sont mélangés, sont plus ou moins altérées suivant la nature des courants qui se succèdent dans la formation des signaux.

[1] Jenkin. *Electricity and Magnetism*, p. 331.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les employés se familiarisent néanmoins assez rapidement avec ces effets et lisent avec facilité ces signaux irréguliers, pourvu que chaque signal élémentaire soit nettement délimité, ce qui exige des variations très brusques dans l'intensité du courant d'arrivée.

APPLICATION AU CABLE ATLANTIQUE DE 1869

Considérons, comme exemple, le câble atlantique français de 1869 dont la longueur l est de 2 584 milles marins, la capacité par mille $\gamma = 0{,}43$ microfarad et la résistance du cuivre $\rho = 2{,}93$ ohms. La formule (11) donne

$$\tau = \frac{0{,}43 \times 2{,}93 \times \overline{2\,584}^{2}}{10^{6}} \times 0{,}029 = 0^{s},245$$

La vitesse de transmission normale sur ce câble avec des récepteurs à miroirs étant d'environ 11 à 12 mots de 5 lettres par minute, et chaque lettre comprenant trois signaux élémentaires, un signal exige environ 0",34 ou 1,38 τ pour parvenir d'une extrémité de la ligne à l'autre.

Si nous représentons, d'un autre côté, par 100 l'intensité limite à l'arrivée du courant émis par une pile déterminée, les intensités à divers temps, comptés à partir du commencement du contact, seront représentées par les nombres de la table ci-dessous [1] :

t exprimé en fonction de τ	INTENSITÉ du courant p. 100	t exprimé en fonction de τ	INTENSITÉ du courant p. 100	t exprimé en fonction de τ	INTENSITÉ du courant p. 100	t exprimé en fonction de τ	INTENSITÉ du courant p. 100
0,4	0,00000000271	1,1	0,04140636	3,5	18,48434	7,8	66,95995
0,5	0,00000051452	1,2	0,0892758o	3,6	19,84366	8,0	68,42832
0,55	0,0000033639	1,3	0,1704802	3,7	21,21342	8,5	71,82887
0,60	0,000016714	1,4	0,2959955	3,8	22,59017	9,0	74,87172
0,62	0,000029252	1,5	0,476336	3,9	23,97171	9,5	77,59133
0,64	0,000049412	1,6	0,720788	4,0	25,35217	10,0	80,02000
0,66	0,000080817	1,7	1,036905	4,2	28,10757	10,5	82,18760
0,68	0,00012835	1,8	1,430252	4,4	30,83807	11,0	84,12139
0,70	0,00019845	1,9	1,904356	4,6	33,52902	12	87,38402
0,72	0,00029937	2,0	2,460812	4,8	36,16892	13	89,97752
0,74	0,00044152	2,1	3,09969	5,0	38,74814	14	92,03836
0,76	0,00063776	2,2	3,81846	5,2	41,26032	15	93,67565
0,78	0,00090371	2,3	4,61560	5,4	43,70028	16	94,97631
0,80	0,00125804	2,4	5,48661	5,6	46,06449	17	96,00951
0,82	0,00172272	2,5	6,42695	5,8	48,35070	18	96,83023
0,84	0,00232333	2,6	7,43163	6,0	50,55770	19	97,48215
0,86	0,00308919	2,7	8,49536	6,2	52,68501	20	98,00000
0,88	0,00405358	2,8	9,61264	6,4	54,73314	21	98,41134
0,90	0,00525387	2,9	10,77797	6,6	56,70294	22	98,73809
0,92	0,00673158	3,0	11,98582	6,8	58,9502	23	98,99763
0,94	0,00853247	3,1	13,23087	7,0	60,41164	24	99,20379
0,96	0,01070646	3,2	14,50800	7,2	62,15439	25	99,36754
0,98	0,01330764	3,3	15,81233	7,4	63,82523	∞	100,00000
1,00	0,01639420	3,4	17,13921	7,6	65,42636		

[1] Jenkin. *Electricity and Magnetism*, p. 330.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La moitié de la charge limite n'est donc atteinte dans ce câble, à l'arrivée, qu'au temps 6 τ et les 9/10 de cette charge qu'au temps 13 τ : un récepteur fonctionnant sous l'influence d'un courant égal aux 0,27 du courant maximum ne serait mis en action qu'au bout d'un temps 4,12 τ ou 1',009 environ.

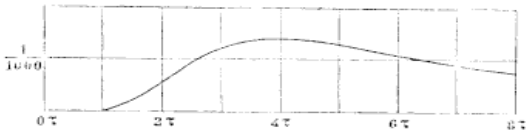


Fig. 389.

Si au temps 5 τ le câble était, au départ, séparé de la pile et mis en communication directe avec la terre, au temps 6 τ, l'intensité du courant, à l'arrivée, serait 50,55770 — 0,01639 = 50,54131 ; au temps 7 τ, elle serait 60,41164 — 2,46081 = 57,95083 et ainsi de suite. Si au temps 7 τ le câble, au départ, était de nouveau mis en communication avec la pile, l'intensité à l'arrivée, au temps 8τ, serait 68,42832 — 11,98582 + 0,01639 = 54,45889.

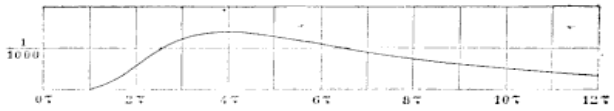


Fig. 390.

Enfin, si, au temps 9 τ, le câble était mis en communication avec le pôle négatif de la même pile, l'intensité du courant, à l'arrivée au temps 10 τ, serait 80,02000 — 38, 174814 + 11,98582 — 2 × 0,01639 = 53,22490 et ainsi de suite.

Si on fait au départ un contact de 0,01 τ = 0',00245 avec une pile de 10 volts, ou de 0,1 τ = 0',0245 avec une pile de 1 volt, en mettant l'extré-

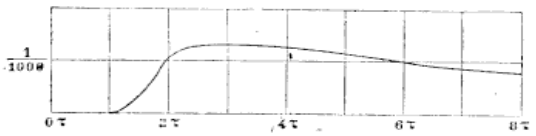


Fig. 391.

mité voisine du câble immédiatement après en communication avec la terre, les intensités du courant à l'arrivée seront représentées par les nombres inscrits dans les deux tableaux ci-dessous [1] et par les courbes (fig. 389) et (fig. 390), l'intensité maximum correspondant à un contact permanent avec la pile de 10 volts étant prise égale à 10 000.

[1] *Journal of the Society of Telegraph Engineers*, vol. VIII, p. 110.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE I

Intensité du courant à l'arrivée après un contact avec la pile d'une durée de :

τ	0,01 τ — le câble mis ensuite à la terre — E = 10 volts	0,1 τ — le câble mis ensuite à la terre — E = 1 volt	Différence
1,0	0,16	0,11	0,05
1,2	0,6	0,48	0,12
1,4	1,5	1,26	0,24
1,6	2,8	2,45	0,35
1,8	4,3	3,9	0,4
2,0	5,9	5,6	0,3
2,2	7,5	7,2	0,3
2,4	9,0	8,7	0,3
2,6	10,3	10,0	0,3
2,8	11,4	11,2	0,2
3,0	12,3	12,1	0,2
3,2	12,9	12,8	0,1
3,4	13,4	13,3	0,1
3,6	13,7	13,6	0,1
3,8	13,8	13,8	0,0
4,0	13,8	13,8[1]	0,0
4,2	13,7		0,0
4,4	13,6		0,0
4,6	13,4		0,0
4,8	13,1		0,0
5,4	12,0		0,0
5,9	11,0		0,0
7,0	9,0		0,0
8,1	7,0		0,0
9,6	5,0		0,0
12,8	3,0		0,0
13,4	2,0		0,0
16,5	1,0		0,0
19,4	0,5		0,0
23,5	0,2		0,0
26,6	0,1		0,0

[1] Le maximum a lieu à 3,84 τ.

TABLE II

1 τ	0,016	5 τ	38,75	9 τ	74,87	16 τ	95,00
2 τ	2,46	6 τ	50,56	10 τ	80,02	20 τ	98,00
3 τ	11,99	7 τ	60,41	13 τ	90,00	∞	100,00
4 τ	25,35	8 τ	68,43				

L'intensité maxima 0,001384 est la même dans les deux cas, ainsi que le faisait prévoir l'équation (13), le produit $^{0}V_{0}$ restant constant. Ce maximum

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est atteint au bout du même temps 3,84 τ, au lieu de 3τ indiqué par la formule (14). Le signal paraît, dans le premier cas, au temps 1,26 τ avec une intensité de courant $\frac{0,81}{10000}$, et dans le deuxième cas, au temps 1,30 τ, soit, après un temps plus long de 0,04 τ seulement, avec une intensité de courant $\frac{0,82}{10000}$.

Quatre contacts alternatifs ayant les durées suivantes :

1° courant + ...	0,203 τ
2° — —	0,247 τ
3° — + ...	0,100 τ
4° — —	0,050 τ
5° câble à la terre	0,400 τ

donnent un signal *bridé :* l'intensité du courant reçu à l'arrivée est représentée par la courbe (fig. 391). La figure 392 montre l'onde électrique qui se

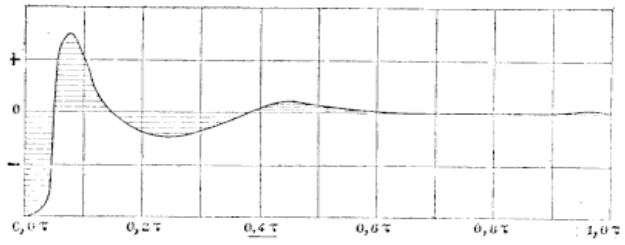


Fig. 392.

propage alors dans le câble ; la première partie de celui-ci est divisée à la fin du temps 0,6 τ en sections contenant des charges alternativement positives et négatives et à potentiels décroissants ; ces charges se combinent ensemble

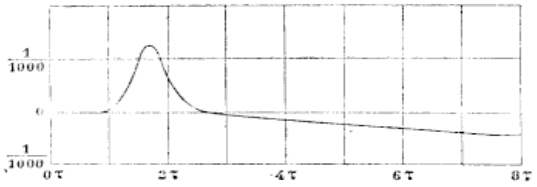


Fig. 393.

et déchargent le câble si rapidement qu'un nouveau signal peut être envoyé après un intervalle de repos de 0,4 à 0,5 τ, soit près de 0,3 τ avant que le signal ne fasse son apparition à l'extrémité éloignée du câble. Si on cherche à réduire davantage cet intervalle de 0,4 τ, les différentes ondes se confondent les unes avec les autres et l'on n'obtient plus de signaux distincts. Le temps 1,1 τ peut donc être considéré comme la vitesse de transmission limite des signaux avec les récepteurs à miroir.

Si, avec le même signal bridé, le câble est coupé par des condensateurs, l'intensité du courant à l'arrivée est représentée par les ordonnées de la courbe (fig. 393) qui s'élève et retombe bien plus rapidement que les précédentes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 2. — VITESSE DE TRANSMISSION DES SIGNAUX

La vitesse de transmission des signaux dans les câbles sous-marins se définit ordinairement par le nombre de mots qui peuvent être expédiés correctement d'une extrémité à l'autre d'un câble en une minute de temps. Le nombre des lettres qui composent les différents mots, dans une même langue, étant très variable, on peut, toutes autres choses égales, transmettre un nombre de mots plus ou moins considérable suivant leur longueur : il est même arrivé, dans des essais, que des phrases formées à dessein de mots ne comprenant que deux ou trois lettres chacun, ont été répétées un grand nombre de fois, de telle sorte que l'on atteignait une vitesse de transmission très différente de la capacité de travail effective du câble soumis à l'expérience. On remédie à cet inconvénient en indiquant le nombre moyen des lettres qui composent les mots : ce nombre était jadis de cinq, mais par suite des règles adoptées pour le compte des mots par les conférences télégraphiques internationales, tend à s'élever à sept. Pour éviter une confusion possible, bien des électriciens donnent comme vitesse de transmission dans un câble le nombre de *lettres* qui peuvent être transmises à travers le câble par minute.

Cette deuxième définition est néanmoins sujette, dans de certaines limites, aux mêmes critiques que la première. Le nombre des signaux élémentaires dont sont composées les différentes lettres de l'alphabet morse varie en effet de 1 à 4. Il devient, par suite, nécessaire de spécifier le nombre de signaux élémentaires dont sont composées les lettres en moyenne. Ce nombre est généralement de trois, quelquefois de quatre, et on néglige les intervalles qui séparent soit les lettres, soit les mots entre eux. Il nous paraîtrait, par suite, plus régulier de donner, pour la vitesse de transmission dans un câble, le nombre des signaux élémentaires qui peuvent être transmis par minute à travers ce câble, tous les signaux se succédant avec le même intevalle, sans avoir aucun égard à la fin des lettres ou des mots.

Cette définition, la seule rationnelle, n'est néanmoins pas entrée encore dans la pratique courante et l'on compte le plus souvent soit par mots, soit par lettres transmises en une minute.

Les premières traces d'électricité arrivent à l'extrémité éloignée du câble avec une vitesse extrêmement grande, mais non infinie, ainsi qu'il résulterait de l'équation (6) qui n'est pas rigoureusement exacte ; il est par suite essentiel, pour augmenter le rendement commercial des câbles, de n'employer sur les longues lignes que les appareils de réception les plus sensibles pos-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sibles, tels que les récepteurs à miroir ou le *siphon recorder* de sir W. Thomson. Mais la valeur de I, dépend, en outre, du potentiel V_0, des constantes ρ, γ et l du câble ; nous allons examiner comment, par un choix judicieux de la force électromotrice de la pile d'une part, et une spécification de l'âme convenablement calculée lors de sa fabrication d'autre part, on peut obtenir dans la pratique le rendement le plus avantageux sur un câble destiné à être immergé entre deux points donnés.

Nous supposerons d'abord que l'on emploie les mêmes appareils récepteurs, ceux à miroir par exemple, de telle sorte que la même intensité de courant soit nécessaire pour les faire fonctionner.

Bien que théoriquement l'état permanent ne puisse jamais s'établir, puisque I_1 n'atteint sa valeur limite $a = \frac{V_0}{\rho l}$ que pour des valeurs infinies de t, nous avons vu que pratiquement au bout d'un temps $10\,\tau$ environ, le courant d'arrivée ne croît plus que très lentement et qu'on peut considérer alors la limite $\frac{V_0}{\rho l}$ comme atteinte. Si donc nous prenons deux câbles de construction identique et ne différant que par leurs longueurs l et l', le courant atteindra la même valeur limite, si les potentiels V_0 et V_0' sont tels que l'on ait

$$\frac{V_0}{\rho l} = \frac{V_0'}{\rho l'}$$

ou

$$\frac{V_0}{V_0'} = \frac{l}{l'}$$

c'est-à-dire si les forces électromotrices des piles employées sont proportionnelles aux longueurs des deux lignes.

Si les récepteurs fonctionnent sous l'action d'une fraction déterminée, $\frac{4}{80}$ par exemple, du courant $\frac{V_0}{\rho l}$, les temps $t = n\tau$ et $t' = n\tau'$ auxquels l'intensité $\frac{1}{80}a$ sera atteinte, seront entre eux dans le rapport

$$\frac{\tau}{\tau'} = \frac{\frac{\gamma \rho l^2}{\pi^2} \log_e \frac{4}{3}}{\frac{\gamma \rho l'^2}{\pi^2} \log_e \frac{4}{3}}$$

par suite

$$\frac{t}{t'} = \frac{l^2}{l'^2}$$

Les vitesses de transmission v et v' dans deux câbles semblables, actionnés par des piles de forces électromotrices proportionnelles à leurs longueurs, sont donc inversement proportionnelles aux carrés des longueurs des deux câbles

$$\frac{v}{v'} = \frac{l'^2}{l^2}$$

Si nous considérons, par exemple, trois câbles de longueurs propor-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tionnelles aux nombres 1, 2 et 3, en communication avec des piles semblables dont les nombres d'éléments soient dans le même rapport, les courants à l'arrivée auront la même intensité limite a que nous prenons

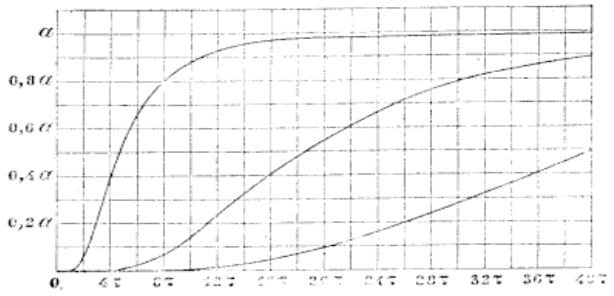


FIG. 394.

égale à 100 sur la figure 394 ; si les appareils récepteurs fonctionnent sous une intensité de courant égale à 0,40 a, on voit que cette intensité sera atteinte en des temps qui sont sensiblement entre eux comme les nombres 1, 4 et 9.

Si les câbles sont de longueurs et de modèles différents, on obtiendra la même intensité de courant si les forces électromotrices des piles employées satisfont à la relation

$$\frac{V_0}{\rho\, l} = \frac{V'_0}{\rho'\, l'}$$

ou

$$\frac{V_0}{V'_0} = \frac{\rho\, l}{\rho'\, l'} = \frac{r}{r'}$$

Les forces électromotrices des piles doivent donc être proportionnelles aux résistances totales r et r' des conducteurs des deux câbles.

Les temps $t = n\tau$ et $t' = n\tau'$ auxquels une même fraction de l'intensité limite, $\frac{1}{80}\,a$ par exemple, nécessaire au fonctionnement des récepteurs, sera atteinte, seront entre eux dans le rapport de

$$\frac{\tau}{\tau'} = \frac{\frac{\gamma\ \rho\ l^2}{\pi^2} \log_e \frac{4}{3}}{\frac{\gamma'\ \rho'\ l'^2}{\pi^2} \log_e \frac{4}{3}}$$

d'où

$$\frac{t}{t'} = \frac{\gamma}{\gamma'} \times \frac{\rho}{\rho'} \times \frac{l^2}{l'^2} = \frac{r\ C}{r'\ C'}$$

Les vitesses de transmission v et v' sont donc

$$\frac{v}{v'} = \frac{\gamma'}{\gamma} \frac{\rho'}{\rho} \frac{l'^2}{l^2} = \frac{r'\ C'}{r\ C}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si les âmes des deux câbles sont composées des mêmes matières, d et D, d' et D' désignant les diamètres respectifs des conducteurs et des âmes, on a

$$\frac{v}{v'} = \frac{d^2}{d'^2}\,\frac{l'^2}{l^2}\,\frac{\log \frac{D}{d}}{\log \frac{D'}{d'}}$$

et, en désignant par K une constante qui est déterminée expérimentalement et qui varie avec la nature de l'appareil récepteur,

$$v = K\, d^2\, \frac{\log \frac{D}{d}}{l^2} \text{ signaux par minute}$$

D'après de nombreuses expériences de M. Willoughby Smith, sur des câbles dont le diélectrique était en gutta-percha perfectionnée et dont le conducteur en cuivre contenait 95 p. 100 de cuivre pur, si l'on fait usage des récepteurs à miroir ou du *siphon recorder*, on aurait

$$K = 1297 \times 10^5$$

Donc

$$v = \frac{1297 \times d^2 \times \log \frac{D}{d} \times 10^5}{l^2} \text{ signaux par minute}$$

D et d étant exprimés en fonction d'une même unité d'ailleurs quelconque et l en milles marins.

Pour un câble construit avec un autre diélectrique, on multiplierait la constante par le rapport inverse des capacités par mille du câble donné et d'un câble en gutta de Smith ayant les mêmes diamètres D et d.

Si l'on applique cette formule au câble atlantique français de 1869, on trouve $v = 232$ signaux ou environ 58 lettres par minute.

Dans le cas le plus général

$$v = \frac{K_1}{r\,C}$$

K_1 désignant une nouvelle constante, r et C exprimant en ohms et en microfarads la résistance totale du conducteur à la température des eaux dans lesquelles il est plongé et la capacité totale du câble.

D'après les expériences de M. W. Smith, K_1 serait égal à 108×10^7. D'un autre côté, M. Muirhead a obtenu, en 1883, sur le câble atlantique de 1881, entre Penzance (Cornouailles) et le cap Canso (Nouvelle-Écosse), 7288 lettres en 81 minutes, répétitions et collationnements compris, soit environ 90 lettres ou 270 signaux élémentaires par minute. La longueur de cette section est de 2518 milles marins, la résistance r du conducteur à 24° C. de 8320 ohms et la capacité C du câble de 939 microfarads. La température du fond de l'Atlantique étant de 3° C. environ, on conclut de ces données

$$K_1 = 240 \times 10^7$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les câbles de Marseille à Alger de 1879 et 1880 donnent couramment en simple, avec le *siphon recorder* et la transmission automatique, 150 lettres par minute, chaque lettre exigeant en moyenne 4 émissions de courant. La résistance de ces câbles, à la température des eaux profondes de la Méditerranée (12°,8), étant de 3350 ω et 5220 ω respectivement et leurs capacités de 136 et 129 microfarads, on a approximativement

$$K^1 = 43 \times 10^7$$

Les divergences considérables que l'on remarque entre ces nombres tiennent à ce que la vitesse de transmission n'est pas tout à fait inversement proportionnelle au carré de la longueur des lignes, mais semble suivre une loi intermédiaire entre la proportionnalité à la longueur simple et celle au carré de la longueur. La propagation de l'électricité est, en réalité, un phénomène plus complexe que nous ne l'avons supposé. Nous n'avons tenu compte dans nos calculs, ni de la réaction du courant sur lui-même, ou *self-induction*, ni du pouvoir absorbant du diélectrique qu'il n'a pas été possible jusqu'à présent d'introduire dans les équations, ni de la résistance de la terre qui n'est pas nulle. Si l'on a égard à la self-induction de la ligne et que l'on néglige au contraire la résistance du conducteur, on trouve que les ondes électriques se propagent dans le fil comme le ferait un mouvement vibratoire dans un fil parfaitement élastique : la vitesse de propagation de ces ondes, dans un fil aérien en cuivre, est sensiblement de 3×10^{10} mètres par seconde. La résistance du conducteur a pour effet d'altérer les ondes électriques, mais leurs premières traces se propagent avec la même vitesse uniforme qu'elles auraient si cette résistance était nulle. C'est dans ce sens seulement que l'expression de *vitesse absolue de l'électricité* a une signification, et l'on voit que cette vitesse est à peu près égale à celle de la lumière.

L'expression

$$v = \frac{K_1}{r\,C} = \frac{K}{\rho\,\gamma\,l^2}$$

ne correspondant pas aux données fournies par l'expérience, nous lui substituerons une relation de la forme

$$v = \frac{1}{\rho\,\gamma}\left(\frac{K}{l} + \frac{K_1}{l^2}\right)$$

K et K_1 étant deux nouvelles constantes qui doivent être déterminées expérimentalement à l'aide d'un nombre suffisant d'observations. En se bornant aux deux cas particuliers que nous avons cités plus haut, on trouve

$$K = 826 \times 10^3$$

et

$$K_1 = 2769 \times 10^4$$

ce qui conduit à

$$v = \frac{1}{\rho\,\gamma\,l}\left(826 + \frac{27690}{l}\right) 10^3 \text{ signaux par minute}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La limite pratique de la vitesse de manipulation qu'un bon télégraphiste peut soutenir, au miroir, ne dépasse pas 135 lettres par minute ; avec les manipulateurs automatiques on arrive, sur les câbles d'Alger, à 600 signaux élémentaires par minute. La longueur l d'une ligne étant donnée, il semble conséquemment inutile de diminuer ρ et γ au-dessous de valeurs telles que leur produit soit inférieur à

$$\rho\,\gamma = \frac{1}{600\,l}\left(826 + \frac{27690}{l}\right)10^{-3}$$

La capacité électrostatique des âmes en caoutchouc de Hooper étant de 2 0/0 environ plus faible que celle des âmes en gutta perfectionnée de M. Smith, la vitesse de transmission sur ces câbles est, à dimensions égales, plus élevée dans la même proportion.

Des télégraphistes très habiles obtiennent en essais, aux récepteurs à miroir, une vitesse un peu supérieure à celle que donne le *siphon recorder ;* mais la vitesse pratique des deux appareils est sensiblement la même.

L'appareil imprimant morse donne une vitesse de transmission de 14 à 16 fois moins rapide que le *siphon recorder* et, pour ce motif ne peut être employé que sur les lignes de moins de 400 milles de longueur, et sous la condition que les poids de cuivre et de gutta-percha ne sont pas inférieurs respectivement à 48 et 63 kilogrammes par mille marin. Combiné cependant avec des relais tels que celui de Brown-Allan, il donne des vitesses plus considérables et peut encore être utilisé sur des lignes d'une longueur supérieure à 400 milles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XVI

APPAREILS DE TRANSMISSION. INSTALLATIONS DES POSTES

§ 1er. Relais et systèmes spéciaux de décharge des cables. — Relais de décharge. — Bobines auxiliaires de décharge. — Manipulateurs Morse à décharge : système Lacoine, système Farjou. — Appareil Hughes avec décharge. — Relais Brown-Allan. — Relais Rambaud. — Relais d'Arlincourt-Willot avec décharge système Rambaud. — Phono-signal Ader.

§ 2. Récepteurs a miroir. — Installation des postes ; contrôle des transmissions au départ, clef de Saunders, radiomètre de Crookes.

§ 3. Siphon-recorder de sir W. Thomson : bobine et électro-aimant ; siphon ; inscription des signaux ; moulinet électrique. — Installation de l'appareil et communications dans les postes de départ et d'arrivée. — Clef de Smith, — de Dickenson. — Ondulateur Lauritzen.

§ 4. Transmissions Duplex. — Méthodes Muirhead, — Anderson et Harwood, — Stearns, — Ailhaud : description, réglage, transmission automatique système Belz et Brahic — Transmission quadruplex.

Conclusion.

Sur les lignes sous-marines de peu de longueur, les transmissions s'échangent à l'aide d'appareils Morse ou Hughes actionnés directement par le courant de la ligne, ou par l'intermédiaire de relais.

Lorsque la longueur des lignes atteint 400 milles marins, il devient nécessaire d'employer des appareils plus sensibles, et on a recours soit au récepteur à miroir, qui ne donne que des signaux fugitifs, soit au *siphon-recorder* ou *siphon enregistreur* de sir W. Thomson, qui trace automatiquement les signaux sur une bande de papier, tout en conservant une sensibilité à peu près égale à celle des appareils à miroir.

Lorsque les bureaux dans lesquels se fait le travail télégraphique sont éloignés des points d'atterrissement des câbles sous-marins, on y amène les conducteurs à l'aide de fils souterrains placés, suivant les cas, en tranchée ou en égout, en constituant de préférence les lignes souterraines avec des câbles du type de mer profonde, et, autant que possible, du même modèle que celui de la ligne principale. La jonction se fait métalliquement dans les guérites : on se borne à y interposer des paratonnerres pour protéger la ligne sous-marine contre les décharges d'électricité atmosphérique.

Lorsque les bureaux sont trop éloignés pour qu'on puisse les relier aux câbles sous-marins par une ligne souterraine, les dépêches sont reçues et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

transmises dans les guérites d'atterrissement même, transformées ainsi en véritables bureaux télégraphiques, et réexpédiées par des fils aériens ; dans d'autres cas, on relie les câbles aux lignes aériennes par l'intermédiaire de *relais* placés dans les guérites ou dans le bureau secondaire le plus voisin. Des relais sont aussi intercalés parfois entre deux sections d'une même ligne sous-marine, afin d'éviter un trop grand nombre de réexpéditions de dépêches. Quelques-uns de ces relais, tels que le relais polarisé de Siemens, les relais d'Arlincourt, Froment, etc., sont bien connus et décrits dans tous les traités de télégraphie ; d'autres, tels que le relais Brown-Allan, sont plus particulièrement employés dans la télégraphie sous-marine.

La transmission *duplex* enfin, ou envoi de signaux en sens inverse, au même instant, sur un même fil conducteur, réalisée théoriquement par le Dr Gintl, de Vienne, dès 1853, et rendue pratique par M. Stearns, en 1872, par l'emploi de condensateurs, a pu être appliquée quelques années plus tard aux câbles sous-marins de toutes longueurs : l'honneur en revient principalement à MM. Varley, de Sauty, Stearns, Muirhead, Taylor, Ailhaud, etc.

§ 1er. — RELAIS ET SYSTÈMES SPÉCIAUX DE DÉCHARGE DES CABLES

RELAIS DE DÉCHARGE

Jusqu'à une distance de 100 à 150 kilomètres, on peut employer l'appareil Morse ordinaire sur les lignes souterraines ou sous-marines. Au delà,

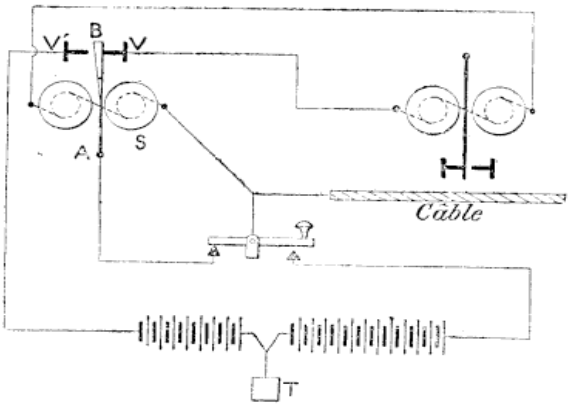


Fig. 395.

il devient nécessaire de ralentir considérablement la manipulation et bientôt même les signaux arrivent complètement déformés au poste correspondant par l'effet de la charge et de la décharge alternatives du câble.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On remédie à cet inconvénient en faisant suivre chaque émission d'un courant produisant un signal, d'un courant plus faible et de sens contraire qui facilite la décharge de la ligne. La durée et l'intensité de ce dernier courant doivent être réglées de telle sorte que le câble soit revenu à l'état neutre, à l'instant où le signal suivant commence. Pour des câbles de moins de 300 milles de longueur, les deux intensités des courants doivent être à peu près dans le rapport de 3 à 2.

Quelquefois on se borne à mettre la ligne en communication directe avec la terre, pendant un instant, après chaque courant de signal.

L'émission du courant de décharge peut être réalisée automatiquement à l'aide de la disposition indiquée par la figure 395. S est un relais polarisé de Siemens dont les bobines ont une résistance à peu près égale à celle de la ligne et du récepteur à l'arrivée ; son armature est munie, du côté où elle doit être mise en communication avec la pile de décharge, d'un ressort destiné à prolonger la durée de son contact avec le butoir correspondant. On règle d'ailleurs la distance des deux vis butoirs V et V' de façon à donner un jeu assez étendu à l'armature A B du relais. Si l'on abaisse la poignée du manipulateur, le courant positif de la pile de ligne se divise entre le câble et le relais S ; l'armature A B se met donc en contact avec la vis V'. Dès que le signal est terminé et que le manipulateur revient à sa position de repos, le courant négatif de la pile de décharge se divise de même entre le câble et le relais S ; la charge d'électricité positive restant dans le câble est neutralisée et l'armature A B ramenée au contact de la vis V.

Diverses autres combinaisons résolvant le même problème d'une manière plus simple ont été imaginées dans ces dernières années.

BOBINES AUXILIAIRES DE DÉCHARGE

A la borne L d'un manipulateur Morse, on attache simultanément le câble et des bobines d'une résistance à peu près égale à celle de la ligne. Lorsque l'on abaisse la clef, la partie du courant qui se rend sur la ligne est sensiblement la même que celle qui la traverserait sans l'addition des bobines de résistance ; lorsque l'on relève la clef, la ligne se décharge presque entièrement à travers la résistance additionnelle, avant que la clef n'ait atteint sa position de repos.

Si l'on veut éviter l'affaiblissement du courant résultant, à l'arrivée, de sa bifurcation entre l'appareil récepteur et la ligne artificielle, on relie cette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dernière à une lame de ressort dont l'une des extrémités est fixe et dont l'autre est mobile entre deux butoirs très rapprochés l'un de l'autre; ces butoirs sont placés au-dessus et vers l'arrière du levier du manipulateur; un petit ressort sollicite constamment la lame vers le butoir inférieur. La pointe d'une vis fixée au levier est réglée de manière à se mettre en contact avec la lame dès que la clef commence à basculer et ce contact persiste jusqu'à l'instant qui précède celui où le levier reprend sa position de repos.

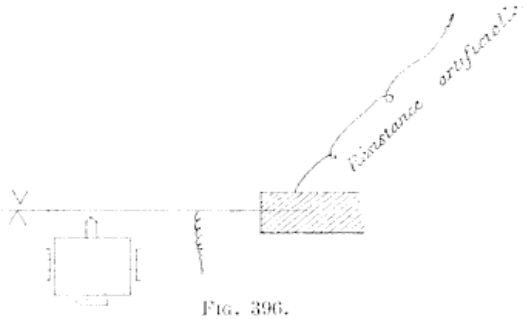


FIG. 396.

Ce système que nous avons imaginé en 1881, lors de la mise en service des premières grandes lignes souterraines en France, a donné de bons résultats sur la ligne souterraine de Paris à Nancy (397 kilomètres). M. Godfroy en a obtenu récemment de meilleurs encore en employant des bobines à enroulement simple, ayant conséquemment une self-induction considérable. L'extra-courant qui se développe dans les bobines après chaque émission, ayant dans le récepteur une direction de sens contraire à celle du courant de décharge du câble, on peut arriver à obtenir un silence presque complet au téléphone et par suite un équilibre presque parfait.

MANIPULATEUR MORSE A DÉCHARGE, SYSTÈME LACOINE

Les enclumes sur lesquelles viennent frapper alternativement les vis de contact antérieure et postérieure du levier du manipulateur, au lieu d'être fixes, sont formées de petites tiges mobiles autour d'un axe et dont la course est limitée par des arrêts convenablement réglés; des ressorts placés sous les tiges tendent à repousser constamment ces dernières vers le haut.

Les communications étant disposées comme l'indique la figure 397, dans la position de repos la ligne est, comme à l'ordinaire, en communication avec le récepteur ; lorsque l'on a abaissé la poignée du levier, le courant de la pile de transmission se rend sur la ligne; enfin pendant une partie des mouvements de bascule du levier, la ligne est reliée directement avec la terre ou avec une pile négative.

Cet appareil a fonctionné avec succès pendant quelque temps sur la ligne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'Otrante à Vallona Il a toutefois l'inconvénient de mettre, avant chaque

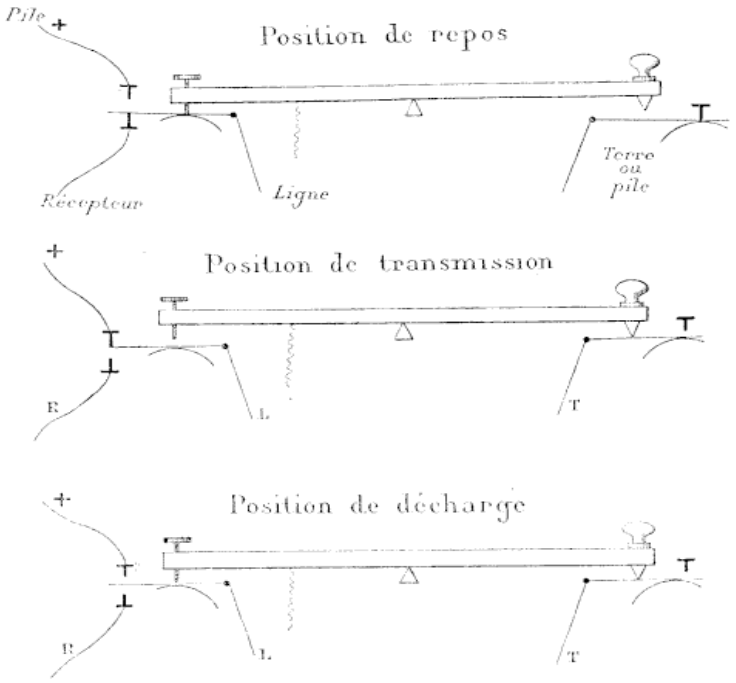


Fig. 397.

émission du courant positif, la pile de ligne directement à la terre, bien que pendant un instant très court.

MANIPULATEUR MORSE A DÉCHARGE, SYSTÈME FARJOU

M. Farjou rompt ou établit la communication entre la ligne et la terre, en utilisant le poids d'une petite masse tantôt en repos, tantôt en mouvement.

A la partie antérieure du levier d'une clef Morse ordinaire (fig. 398) est fixée une tige rigide A B, dont l'extrémité A est, à l'état de repos, très voisine, sans cependant la toucher, de la plus courte branche O L d'un levier coudé L O K, mobile autour du point O. Une bille C s'appuie contre l'extrémité K de la grande branche O K de ce levier et peut rouler sur un plan incliné F M, muni de deux guides latéraux et d'une tige G formant arrêt vers le haut ; elle repose en outre sur un ressort très flexible I H, encastré à son extrémité H dans un bloc S. La course du ressort I H, lorsqu'il devient libre durant le mouvement de la bille C sur le plan incliné, est limitée par une vis

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'arrêt V placée au-dessus et très près de ce ressort. La vis V est reliée directement à la terre et le bloc S à l'enclume postérieure E du manipulateur.

Lorsque la bille repose sur l'extrémité I du ressort I H, elle sépare celui-ci de la vis V et permet au courant de la ligne L d'arriver au récepteur. Si

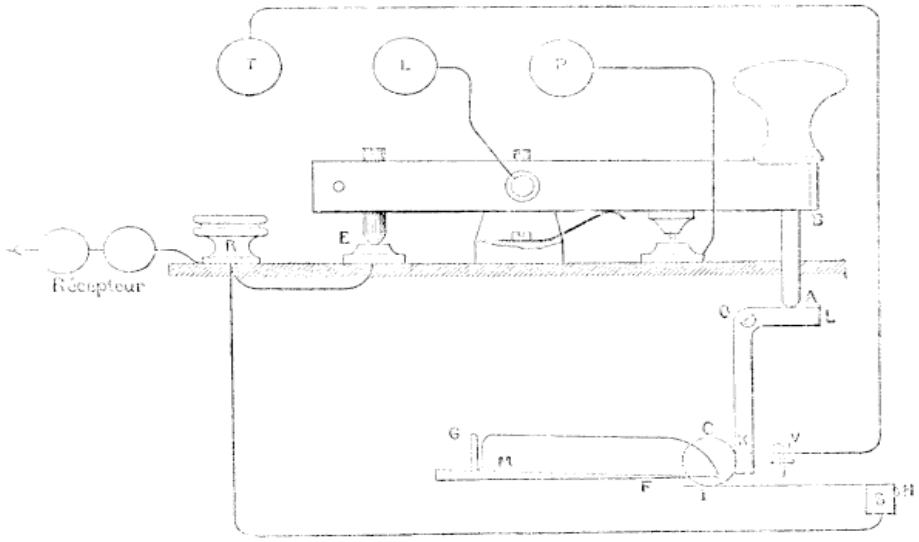


Fig. 398.

l'on abaisse la poignée du manipulateur, le levier coudé tourne légèrement autour de son axe O et la bille C est projetée sur le plan incliné ; le ressort I H se met en contact direct avec V et l'enclume E est par suite directement à la terre. La communication du levier du manipulateur avec E étant rompue à ce moment, le courant de la pile P passe sans difficulté sur la ligne ; mais, dès qu'abandonnant la poignée de la clef on laisse celle-ci reprendre sa position normale, la ligne L est en communication avec E et par I H et V avec la terre. La longueur et l'inclinaison du plan F M sont calculées de telle sorte que la bille C ne revienne s'appuyer sur le ressort I H qu'un instant seulement après que la clef est revenue à sa position de repos. La communication est alors interrompue de nouveau entre l'enclume E et la vis V ; le correspondant peut donc couper la transmission jusqu'à l'instant où l'on abaisse la clef pour émettre encore un courant.

Si les signaux se succédaient avec une trop grande rapidité, la bille n'aurait pas le temps de revenir sur le ressort à la fin de chaque émission de courant ; la décharge de la ligne serait moins complète et on ne pourrait plus couper le poste transmetteur qu'à la fin des mots.

M. Farjou a ajouté à ce manipulateur un dispositif qui permet d'envoyer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un courant négatif de compensation sur la ligne pendant le temps employé par le levier pour revenir de la position d'émission à celle de réception. A cet effet le levier porte à sa partie antérieure une petite tige horizontale *a* (fig. 399) recouverte *en dessous* d'une plaque isolante en ivoire ou en ébonite. Cette tige se meut entre les deux branches d'une fourchette *m n* mobile elle-même autour d'un axe horizontal passant par son centre de gravité. L'extrémité *m* de la fourchette, taillée en biseau, se déplace devant une came *c*, d'une forme spéciale et fixée à un ressort *r* ; ce dernier

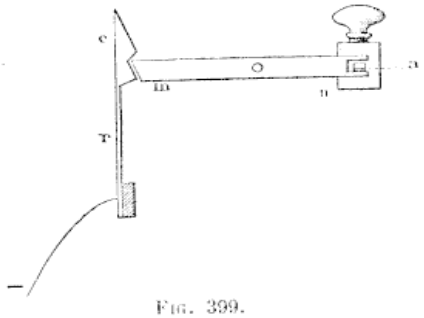


FIG. 399.

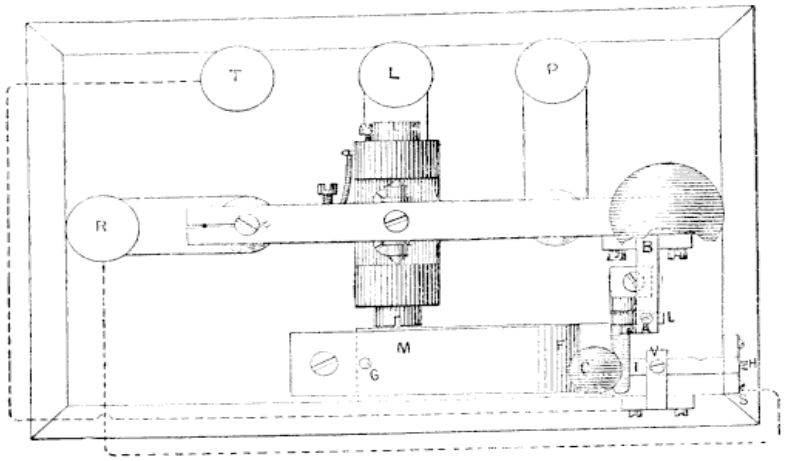


FIG. 400.

est relié à la pile de compensation. Lorsque le levier est au repos ou au point le plus bas de sa course les pièces *c* et *m n* se trouvent séparées l'une de l'autre ; elles arrivent au contact lorsque le levier s'abaisse ou se relève. Dans le premier cas, la tige *a* s'appuyant sur la fourchette par la plaque d'ivoire, la ligne reste sans communication avec la pile de compensation ; dans le second cas au contraire, la tige entraîne avec elle la branche supérieure de la fourchette et un courant négatif temporaire est envoyé sur la ligne.

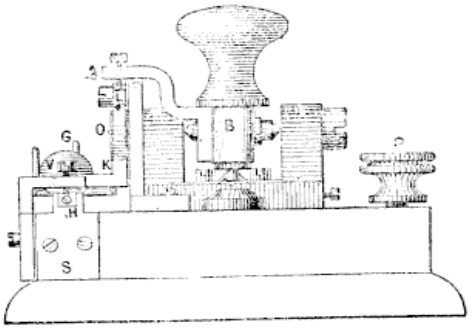


FIG. 401.

M. Farjou a même dédoublé cette partie de l'appareil de manière à faire com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mencer l'émission du courant positif dès que le levier a quitté sa position de repos.

A l'arrivée le récepteur est monté en *trembleur :* les différents signaux sont ainsi plus nettement séparés les uns des autres.

Les figures 400 et 401 donnent des vues en plan et en élévation de cet instrument dont la figure 398 ne représente que la disposition théorique. Mis en essais sur la ligne souterraine de Paris à Bordeaux (650 kilomètres), il a permis d'obtenir des signaux Morse d'une grande netteté, sans aucun relais intermédiaire, à la vitesse d'environ 120 lettres par minute.

APPAREIL HUGHES AVEC DÉCHARGE

L'appareil Hughes est d'un usage assez restreint en télégraphie sous-marine. Le public, en France surtout, n'ayant cependant pas cessé d'apprécier l'avantage que lui présentent des dépêches imprimées, nous avons dû modifier cet appareil, en 1881, après la mise en service des premières lignes

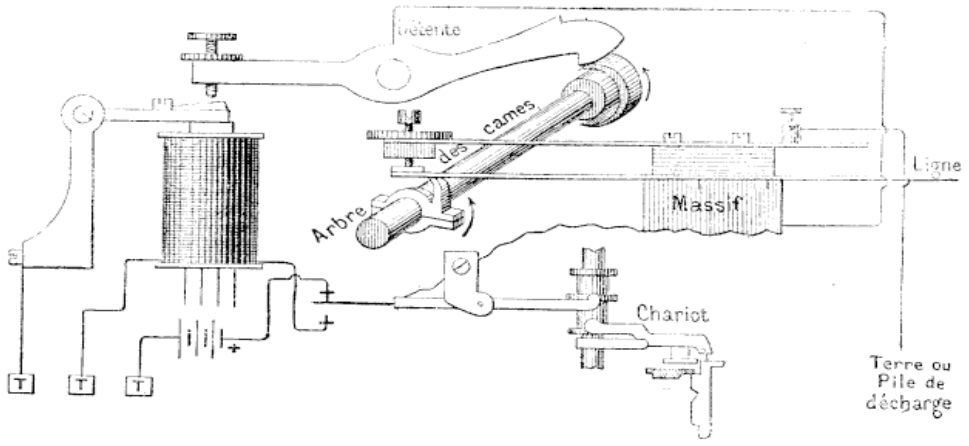


FIG. 402.

souterraines françaises à grande distance. En raison de l'analogie que présentent les conditions d'exploitation de ces lignes avec celles des lignes sous-marines, nous croyons intéressant d'indiquer le dispositif que nous avons réalisé avec le concours de M. Borel et qui a été adopté par l'administration française des télégraphes.

Avec des appareils à déclanchement automatique et des courants de même polarité, le courant de décharge produit, au poste qui transmet, l'effet d'un courant émis par le poste correspondant, et prolonge, au poste qui reçoit, le courant de la pile. Si la ligne est chargée par plusieurs courants se suc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cédant à des intervalles très rapprochés, le courant de retour peut devenir assez énergique pour déterminer l'impression de lettres supplémentaires.

Pour en détruire l'effet, sur l'arbre des cames, dans l'espace resté disponible entre les deux platines, on fixe une came en acier qui, à un moment déterminé, vient appuyer contre un ressort qu'elle soulève (fig. 402). Ce ressort vient buter contre une vis fixée sur un second ressort isolé du massif de l'appareil par une plaque d'ivoire ou d'ébonite et en communication avec une pile de décharge. La forme et la position de la came sont calculées de telle sorte que le contact avec cette pile commence un instant avant que le contact avec la pile de ligne soit terminé, et se prolonge jusqu'à ce que la ligne soit en communication directe avec la terre par l'intermédiaire de l'ossature de l'électro-aimant. Le courant compensateur dure ainsi 1/4 environ du temps pendant lequel le courant de la ligne a été émis; leurs intensités doivent être à peu près dans le même rapport.

La vis placée sur le second ressort facilite le réglage du système.

On se borne quelquefois à remplacer la pile de décharge par une simple communication avec la terre. Mais, à moins que la ligne ne soit assez courte, la décharge est alors moins parfaite.

Sur la ligne souterraine de Paris à Nancy (397 kilomètres), l'appareil Hughes ainsi modifié fonctionne couramment à la vitesse de 105 à 110 tours de chariot par minute. Il permet de transmettre environ 160 lettres par minute.

RELAIS BROWN-ALLAN

Cet appareil se compose (fig. 403) d'un électro-aimant à une seule bobine, très léger, suspendu par un fil de platine F à une forte potence H, de façon à être parfaitement mobile : on règle exactement la position qu'il doit occuper en tournant la vis V et tendant plus ou moins les deux fils de soie f_1 et f_2. Le noyau creux A B de l'électro-aimant est placé au milieu de l'intervalle libre entre les pôles N, S, N', S' de deux forts aimants en fer à cheval ; son extrémité A est attachée à deux ressorts antagonistes r_1 et r_2. Une tige en fer doux $a\ b$, pressée contre la face supérieure de l'électro-aimant, peut tourner à frottement dur autour d'un axe vertical e porté par la bobine ; l'amplitude très faible de sa course est limitée par les deux vis butoirs v_1 et v_2. Si un courant traverse la bobine dont la résistance est généralement de 500 ohms, le noyau s'aimante et son extrémité A tend à se rapprocher du pôle S' par exemple. La tige $a\ b$ suit le mouvement, mais cette tige rencontrant presque immédiatement le butoir v_1 s'arrête aussitôt, ferme un circuit local et laisse la bobine continuer seule son mouvement. Dès que celle-ci commence à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

revenir à sa position de repos, la tige *a b* se trouve entraînée avec elle et vient buter presque immédiatement contre la vis v_2.

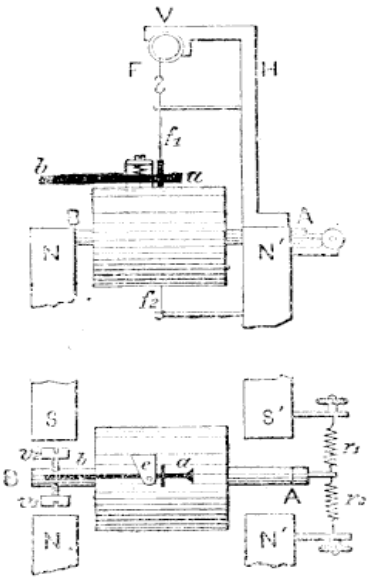


Fig. 403.

Dans d'autres modèles de ce relais, la tige *ab* (fig. 404 et 405) est montée sur le même axe *mn* qu'une seconde tige un peu plus grande *cd* : un ressort réglé par une vis de pression *m*, maintient les deux tiges en contact et assure l'entraînement de *ab* par *cd*. L'axe *mn* est fixé en dehors de la bobine de l'électro-aimant et l'extrémité *c* de la tige *cd* se trouve à une très petite distance de celle A du noyau A B qu'elle suit dans tous ses mouvements. La tige *ab*, entraînée au début, est arrêtée presque immédiatement après par les vis butoirs v_1 et v_2.

Les communications sont établies comme l'indique la fig. 406. Dans la position de réception, le commutateur I se trouve sur le contact n° 1 : le courant sortant du câble traverse la bobine M de l'électro-aimant du relais et se perd à la terre.

L'attraction de l'armature *ab* contre la vis v_1 ferme le circuit de la pile locale p_1 et du récepteur Morse R. Entre les bornes de ce récepteur, on intercale souvent un petit condensateur C destiné à diminuer les étincelles que l'extra-courant fait éclater entre l'armature *ab* et la vis v_1.

Fig. 404.

Pour passer à la position de transmission, on amène le commutateur I sur le contact n° 3 ; le relais B se trouve ainsi remplacé dans le circuit par l'inverseur de courant K et le manipulateur D. Le premier est actionné par la pile locale p_2, lorsque l'on manœuvre D ; l'armature L se trouvant alors attirée par l'électro-aimant M', rompt le contact du levier f_1 avec la vis *t* et permet au contraire au levier f_2 de s'appuyer contre cette même vis. Le pôle négatif de la pile de ligne P est mis ainsi à la terre ; le courant partant du pôle positif traverse l'armature L et arrive au câble par le contact 3 du commutateur I.

Ce relais, employé surtout par l'*Eastern telegraph C°*, une fois bien réglé, peut fonctionner pendant plusieurs mois sans qu'il soit nécessaire d'y toucher : il donne de bons résultats sur des lignes de longueur moyenne. La section de Bushire à Kurrachee, par exemple, du câble du golfe Persique

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dont la longueur est de 1 050 milles, donnait, lorsque la communication métallique était établie à la station intermédiaire Jask, 65 lettres par minute,

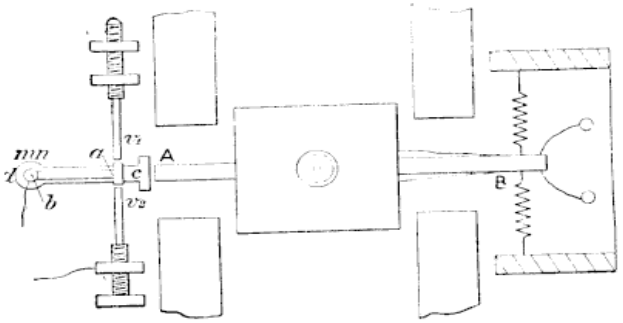


Fig. 405.

tandis que l'on obtenait une vitesse double sur les deux sections de longueurs à peu près égales Jask-Bushire et Jask-Kurrachee. En établissant à Jask une translation avec relais Brown-Allan, la vitesse de transmission de Bushire à Kurrachee s'éleva à 100 lettres par minute, en essais au moins

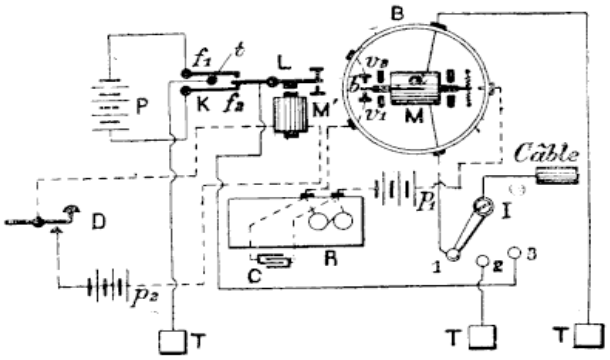


Fig. 406.

Des essais de transmission directe entre Malte et Londres, avec relais Brown-Allan à Bône et à Marseille (et en maintenant les translations ordinairement établies à Paris et à Beachy-Head), n'ont donné qu'une vitesse de 45 à 50 lettres par minute, bien inférieure à celle que l'on obtient sur la ligne aérienne seule et sur le câble seul, et en faisant usage, pour ce dernier, du miroir ou du recorder.

RELAIS RAMBAUD

Ce relais, qui ne fonctionne encore qu'à titre d'essai sur la ligne souterraine de Paris à Bordeaux (650 kilomètres), où il donne d'excellents résultats,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pourrait également être employé avec avantage sur les lignes sous-marines de longueur moyenne. Il décharge automatiquement la ligne après chaque émission de courant et par la perfection de sa construction, se prête à un travail rapide, tant par l'appareil Morse que par l'appareil Hughes. La figure 407 en donne le dessin schématique ; les figures 408 et 409 représentent en plan et en élévation un *translateur*, les figures 410 et 411 en plan et en élévation un parleur de décharge ; ces organes existent en nombre double dans l'appareil complet, mais sont entièrement symétriques par rapport à un plan médian.

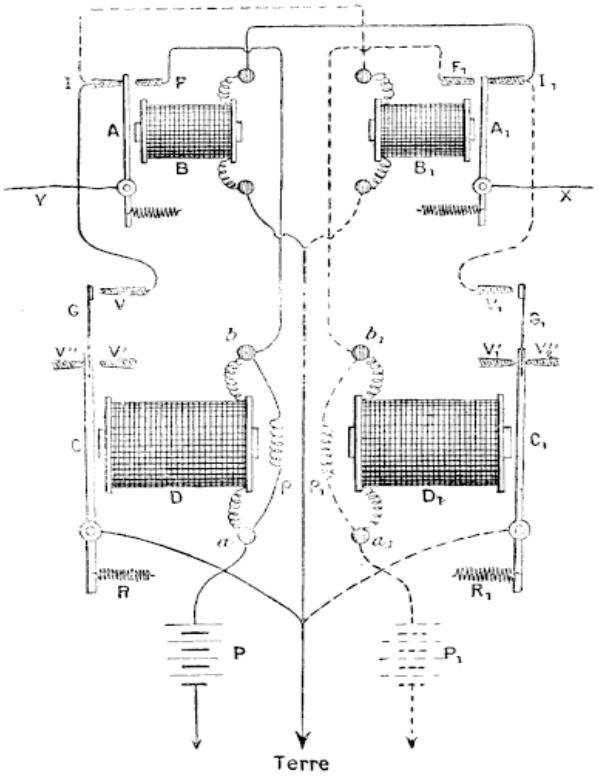


Fig. 407.

Le courant venant de la ligne X traverse l'armature A_1 à l'axe de rotation de laquelle elle est attachée, la vis butoir I_1, l'électro-aimant *translateur* B et se rend directement à la terre. L'armature A de cet électro-aimant est attirée, se met en contact avec la vis

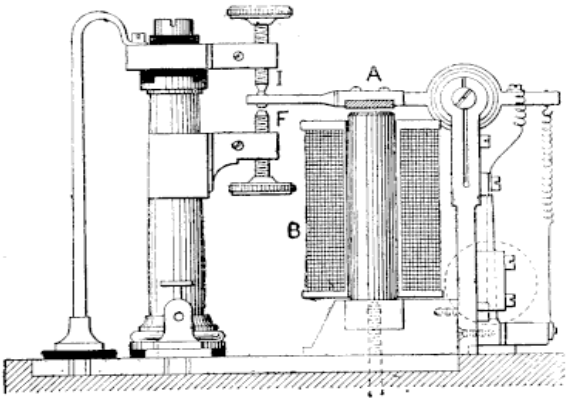


Fig. 408.

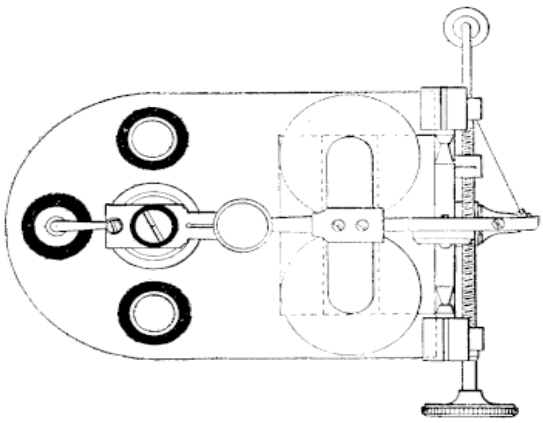


Fig. 409.

butoir F qui est reliée à la pile P ; le courant de cette pile est donc envoyé sur la ligne Y.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Entre la vis F et la pile P est intercalé un second électro-aimant D, dit *parleur* qui est, par suite, parcouru par le courant de la pile P dès que le circuit de la ligne Y est fermé. L'armature C de cet électro-aimant oscille entre deux butoirs arrêts isolés V′ et V″ et communique en permanence avec la terre : un ressort R la fait appuyer, à l'état de repos, contre la vis V″. Le bras de levier le plus long de l'armature C porte une lame de ressort longue et flexible G terminée par un contact qui vient s'appuyer contre un butoir V dès que la palette C a quitté sa position de repos. Cette communication persiste pendant tout le temps que la partie rigide de l'armature met à s'avancer vers l'électro-aimant D pour s'appuyer contre la vis V′, et dans son mouvement inverse jusqu'au moment où la lame G a repris une direction rectiligne, un instant seulement avant celui où l'armature C se met de nouveau en contact avec la vis V′. La ligne Y se trouve ainsi en communication directe avec la terre dès que l'armature A revient au contact de la vis I, par suite de la cessation du courant venant de la ligne X et jusqu'au moment où l'armature C va revenir à sa position de repos. Afin d'obtenir une durée de la décharge plus longue, les mouvements de l'armature A sont rendus très rapides tandis que ceux de l'armature C sont au contraire ralentis.

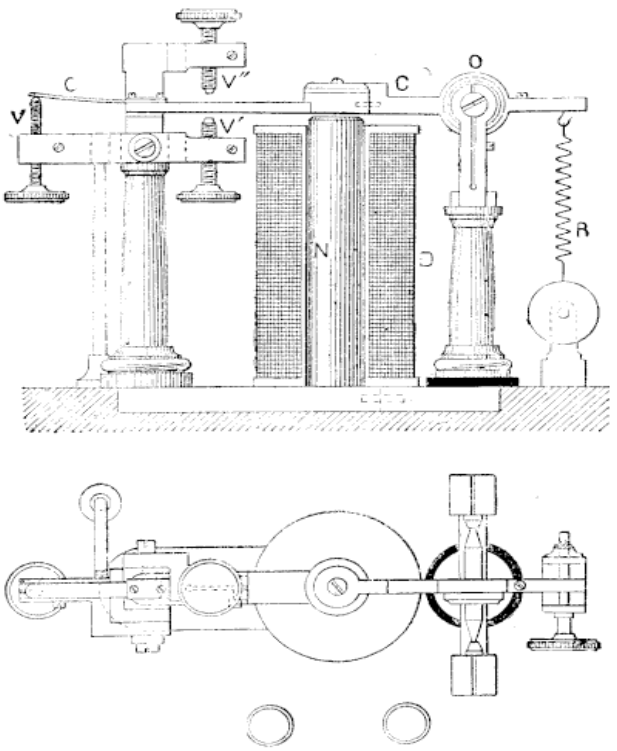


Fig. 410 et 411.

L'électro-aimant de chaque translateur se compose, à cet effet, de deux bobines très petites et d'une résistance totale de 500 ohms. Les noyaux, en fer doux d'excellente qualité, sont creux et fendus dans le sens de leur longueur, afin d'éviter la production des courants de Foucault qui prolongeraient leur aimantation : les carcasses des bobines sont, pour le même motif, en ébonite ou en buis. Les armatures sont également en fer doux de qualité supérieure, de manière à rendre plus rapides les variations d'aimentation et à annuler autant que possible, le magnétisme rémanent. Elles

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ont une masse assez forte pour donner, malgré l'action répulsive du courant des bobines, une pression suffisante sur la vis F, qui est reliée à la pile, de manière à éviter un tremblement qui nuirait à la netteté des signaux.

La masse relativement grande de l'armature A augmentant le moment d'inertie du système mobile, tend à diminuer sa vitesse angulaire; mais cette diminution est compensée par une diminution correspondante du chemin angulaire à parcourir. L'axe de rotation de l'armature A est pour ce motif très éloigné des vis butoirs et celles-ci sont aussi rapprochées que possible l'une de l'autre : la tige que soutient l'armature A se porte ainsi très rapidement sur la borne F et revient aussi très vite sur la borne I. Cette disposition présente, en outre, l'avantage de ne déplacer que d'une quantité insignifiante le point d'attache du ressort antagoniste dont la tension reste toujours à peu près la même et d'éviter, dans l'aimantation des noyaux de l'électro-aimant, les réactions nuisibles que produiraient des mouvements de l'armature d'une plus grande amplitude.

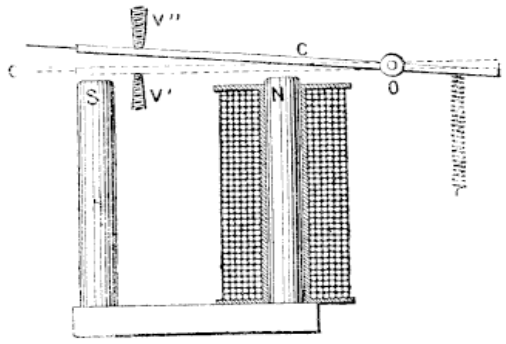


FIG. 412.

Les parleurs se composent, au contraire, d'électro-aimants dits boiteux (fig. 412); la branche sans bobine se trouvant du côté opposé à l'axe de rotation, au moment du passage du courant la branche N a une action prépondérante, en raison de la grande distance qui sépare l'autre branche S de l'armature ; l'effet inverse se produit lors de la cessation du courant, bien que la branche S soit moins fortement aimantée que la branche N, le bras de levier O S étant triple environ de celui O N. Il en résulte dans le retour de l'armature C à sa position de repos, un retard considérable que l'on peut régler en élevant plus ou moins la vis V'. Le magnétisme rémanent étant d'ailleurs plus considérable lors du passage d'un courant de durée plus longue produisant un trait morse, que pour un courant de durée plus faible produisant un point, la période de décharge est augmentée dans le premier cas. Il en est de même pour une succession rapide d'émissions brèves. Le relais fait donc varier automatiquement la durée de la mise à la terre, suivant les besoins de la décharge.

La résistance de la bobine de chaque parleur est de 300 ohms ; les noyaux de fer doux sont longs, de façon à retarder la recombinaison du magnétisme des pôles extrêmes et à augmenter ainsi le magnétisme rémanent. L'armature est lourde et son moment d'inertie rendu très grand par la forme allongée qui lui est donnée, ainsi que par l'éloignement de son axe de rotation. La

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lame de ressort qui la termine est longue et mince afin d'éviter qu'elle n'agisse comme ressort de rappel : le ressort à boudin auquel ce rôle est réservé est très peu tendu et composé d'un très grand nombre de spires, afin que le déplacement linéaire de son point d'attache ne lui donne pas un surcroît de tension nuisible pendant le mouvement de l'armature.

Pour éviter enfin l'étincelle qui éclaterait entre la vis F et l'armature A, à chaque rupture de circuit, et qui serait due à l'extra-courant direct développé dans la bobine D, une résistance ρ de 2 000 ohms environ est placée en dérivation entre les bornes a et b de la bobine D. L'extra-courant circule ainsi dans un circuit fermé sans avoir à se rendre sur la ligne : il prolonge en outre l'attraction de l'armature C et vient par suite en aide au magnétisme rémanent de l'électro-aimant boiteux.

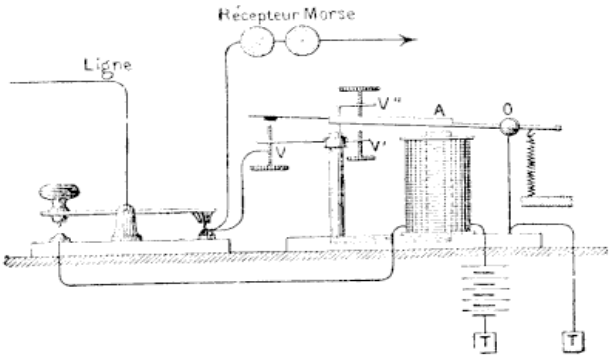


Fig. 413.

La bobine ρ doit néanmoins être faite en fil très résistant en vue de ne pas trop diminuer l'intensité du courant produit par la pile P dans la bobine D et ne pas retarder ainsi l'attraction de l'armature C, et par suite, la décharge de la ligne.

M. Rambaud a combiné, en outre, son parleur avec un manipulateur morse ordinaire (fig. 413) de façon à décharger automatiquement la ligne au départ, après chaque émission, comme le fait le relais au point où il est installé.

RELAIS D'ARLINCOURT-WILLOT AVEC DÉCHARGE SYSTÈME RAMBAUD

Le système de décharge de M. Rambaud a été appliqué aussi au relais d'Arlincourt modifié par M. Willot. On sait que sous cette dernière forme les extrémités des deux branches de l'aimant fixe, recourbé en fer à cheval, viennent affleurer des pièces de fer doux fixées deux à deux, les unes à la culasse de l'électro-aimant, les autres aux extrémités des noyaux. Entre les deux pièces de chaque paire et à une très petite distance du pôle voisin de l'aimant fixe se trouve une palette en fer, rendue solidaire avec celle qui est placée sur la même verticale, à l'aide d'une tige rigide en cuivre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure 414 qui représente en plan cet appareil avec ses parleurs de

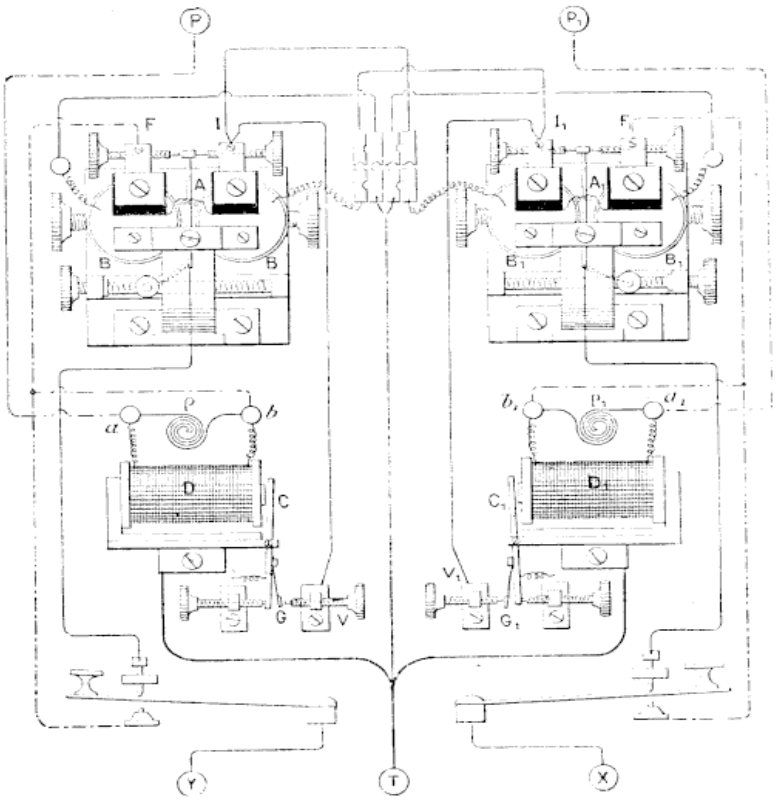


Fig. 414.

décharge permet de suivre, facilement le détail des communications.

PHONO-SIGNAL

M. Ader a donné ce nom à un arrangement dans lequel les courants partis de l'extrémité d'un câble souterrain ou sous-marin arrivent, à l'extrémité opposée, dans deux téléphones insensibles chacun aux courants de sens contraire qui actionnent l'autre appareil : les deux téléphones sont parcourus par des courants ondulatoires locaux, et résonnent en permanence. Si, à l'aide d'un manipulateur à double clef ordinaire, on lance dans le câble un courant positif, le téléphone de gauche, par exemple, continue seul à vibrer et donne un son renforcé, tandis que le téléphone de droite devient muet pendant un instant. L'effet inverse se produit avec un courant négatif. On

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

perçoit ainsi, tantôt à droite, tantôt à gauche, des sons que l'on interprète avec la même facilité que les déviations d'un index lumineux dans un sens ou un autre sur une bande de papier.

M. Ader a réalisé deux dispositions différentes de cet arrangement : le plus simple est celui représenté par la figure 415. L'extrémité du câble, à la station d'arrivée, est mise en communication avec un trembleur V dont le

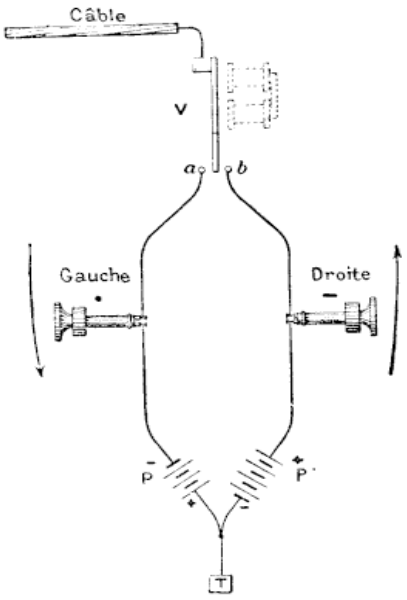


Fig. 415.

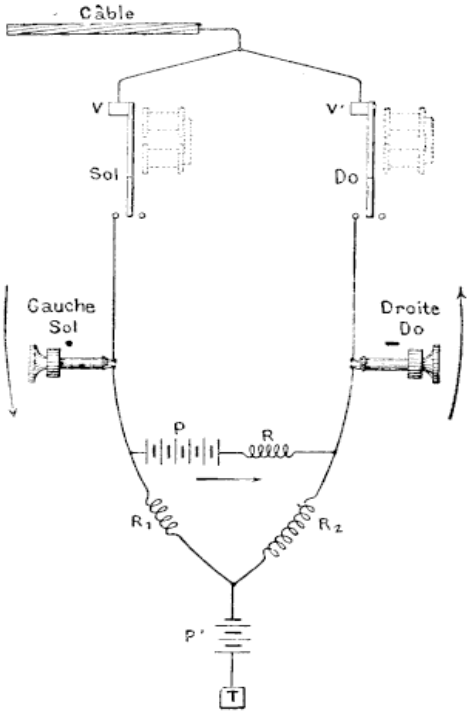


Fig. 416.

mouvement est entretenu par une pile locale ; les deux vis butoirs *a* et *b* entre lesquelles oscille l'armature de ce trembleur sont reliées à deux téléphones et à deux piles P, P' égales et opposées par leurs pôles de noms contraires ; les deux autres pôles de ces piles sont mis à la terre. Les intensités des deux piles sont réglées de telle sorte qu'un courant positif sortant du câble soit annulé dans le téléphone de droite par le courant de la pile P' ; il s'ajoute, au contraire, dans le téléphone de gauche au courant de la pile P. On voit dès lors que les émissions de courants positifs produisent un renforcement du son dans le téléphone de gauche, et des silences dans le téléphone de droite, et inversement.

Pour permettre à l'employé de saisir plus facilement de quel côté ont lieu les renforcements de sons ou les silences et, par suite, de distinguer plus

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aisément les signaux correspondant à des points de l'alphabet morse de ceux correspondant à des traits, M. Ader a imaginé de donner aux deux téléphones des tonalités différentes. La figure 416 représente cette seconde disposition qui forme une sorte de pont de Wheatstone. Chaque téléphone est actionné par un trembleur spécial convenablement réglé, de manière à donner à gauche un son plus aigu tel qu'un sol, à droite un son plus grave tel que le do de la même octave. Une pile unique P est placée dans la diagonale du pont avec une résistance R ; cette résistance, ainsi que celles R_1 et R_2, facilite le réglage.

Une pile d'opposition P′ est placée dans la seconde diagonale comprenant la terre, lorsque le câble est parcouru par des courants telluriques.

On peut utiliser comme transmetteur les doubles clefs ordinaires manœuvrées à la main ou des manipulateurs automatiques. On obtient des sons plus nets et une transmission plus rapide en déchargeant automatiquement la ligne par un courant inverse plus faible après chaque émission d'un courant de signal.

Essayé sur la ligne souterraine de Paris à Marseille (980 kilomètres), le phono-signal a donné de bons résultats avec une pile de ligne de 50 éléments Callaud et des piles locales de 5 à 6 éléments.

Ce nombre d'éléments relativement considérable est nécessaire pour combattre les effets de l'induction due au travail des fils voisins. Mais une dérivation directe à la terre était établie alors sur la ligne, avant sa jonction avec les appareils de réception ; une résistance supplémentaire était en outre intercalée entre ces appareils et la terre. Avec 50 éléments en ligne, la résistance de dérivation était de 200$^{\omega}$ et la résistance supplémentaire de 14 000$^{\omega}$; le courant qui circulait dans les téléphones n'était donc plus que la 70^{e} partie environ du courant principal, soit $\frac{50}{980 \times 5{,}3 \times 70} = \frac{1}{7}$ de milliampère à peu près. Ce nombre donne une idée de la sensibilité de l'appareil et permet de calculer le nombre d'éléments de pile qu'il serait nécessaire d'employer, pour le faire fonctionner, sur des lignes ne comprenant qu'un seul conducteur, telles que les lignes sous-marines en général.

Le phono-signal peut être établi sans difficulté en duplex.

§ 2. — RÉCEPTEURS A MIROIR

Les récepteurs à miroir (figure 417) ne diffèrent des galvanomètres à réflexion de sir W. Thomson qu'en ce qu'ils ne comportent qu'une bobine de fil et un système d'aiguilles aimantées collées au dos du miroir. Ce dernier, suspendu à un fil de cocon très court, est enfermé dans un tuyau

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en cuivre que l'on introduit au centre de la bobine, comme dans les galvanomètres apériodiques. Un gros aimant semi-cylindrique enveloppe complètement la moitié supérieure de la bobine, et peut recevoir, à l'aide d'une vis placée à l'extérieur de l'appareil, des mouvements limités autour d'un axe vertical : on ramène l'aiguille à sa position normale en déplaçant

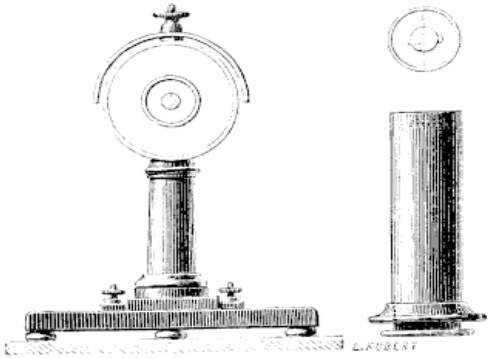


Fig. 417.

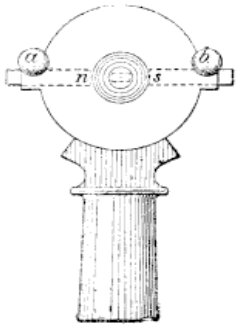


Fig. 418.

légèrement cet aimant dans le sens convenable. L'appareil entier est porté sur un pied en bois sur le socle duquel se trouvent quatre bornes. Ces bornes correspondent aux circuits des deux fils de 1000 à 2000 ohms de résistance chacun, qui sont enroulés sur la bobine : en les combinant de diverses manières, on peut obtenir, dans chaque cas particulier, la résistance qui se rapproche le plus de celle qui donnerait théoriquement le maximum d'effet.

Les rayons lumineux émanant de la lampe à pétrole, après avoir traversé une fente étroite et allongée, pratiquée dans un écran, sont reçus sur une lentille, et après s'être réfléchis sur le miroir, tombent sur une feuille de papier blanc portée par un pied. On déplace ce pied de façon que l'image lumineuse, si l'appareil est au repos, se forme sensiblement au milieu de l'écran blanc.

Un signal ne pouvant succéder à celui qui le précède que lorsque le miroir est revenu à sa position d'équilibre, MM. Siemens frères remplissent de glycérine très diluée le tuyau de cuivre qui contient le miroir. Les oscillations de l'appareil sont ainsi considérablement amorties sans que l'index lumineux en soit altéré d'une manière sensible.

Dans ces mêmes appareils, l'aimant directeur semi-cylindrique est remplacé par deux aimants rectilignes qui pénètrent jusqu'au tuyau de cuivre en présentant en regard l'un de l'autre des pôles de noms contraires (fig. 418). Deux roues dentées *a* et *b*, engrenant avec des crémaillères fixées sur les deux aimants, permettent de régler l'instrument avec beaucoup de précision.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Installation des postes

Lorsque la communication est établie en *simple*, chaque poste recevant et transmettant alternativement, l'installation est celle représentée schématiquement par la figure 419. En appuyant le doigt sur l'une ou l'autre touche de la double clef M, l'employé envoie dans le condensateur voisin C une charge électrique positive ou négative et, par suite, produit sur le récepteur à miroir G de la station éloignée une déviation de l'index lumineux,

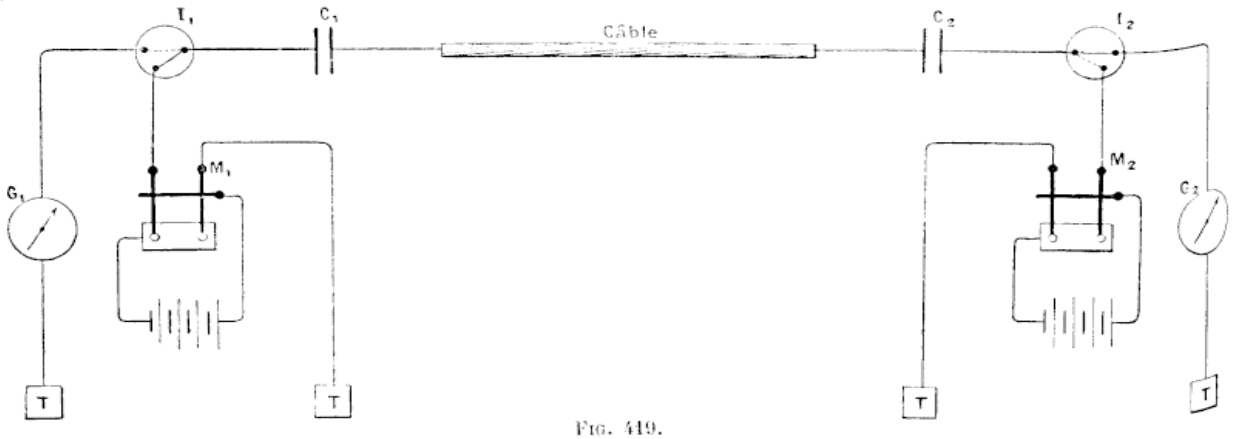


FIG. 419.

dans un sens ou dans le sens opposé. Il manœuvre le commutateur I chaque fois qu'il passe de la position de transmission à celle de réception ou inversement. Dans notre figure, la station 1 se trouve dans la position de transmission, et la station 2 dans celle de réception,

Des signaux nets à l'arrivée exigent, au départ, une manipulation bien cadencée et une durée des contacts proportionnée à la longueur de la ligne et à la structure électrique de l'âme. Des émissions de courant trop brèves seraient insuffisantes pour charger convenablement le câble et les signaux ne se développeraient plus dans de bonnes conditions à l'extrémité opposée ; des émissions trop longues feraient naître des contre-signaux que l'on ne saurait plus distinguer des signaux proprement dits.

Pour nous rendre compte de ce dernier effet, supposons qu'une touche déjà abaissée de la double clef soit maintenue dans cette position jusqu'à ce que la charge des deux condensateurs et du câble soit complète : l'index lumineux reviendra et restera au zéro ; au moment où on lâchera la touche, la décharge de C_1, de C_2 et du câble donnera naissance à un courant instantané inverse qui produira, à la station réceptrice, un second signal de sens contraire au premier. Chaque dépression de l'un des ressorts du manipula-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teur donnant ainsi deux signaux inverses l'un de l'autre, la lecture serait impossible. Si la touche n'est abaissée, au contraire, que pendant un temps très court, l'aiguille du galvanomètre G_2, après avoir dévié, reviendra immédiatement au zéro mais sans dépasser ce point, le courant de décharge n'ayant plus alors pour effet que d'accélérer ce mouvement. Si cependant la durée du contact était un peu trop longue et que l'aiguille eût déjà commencé son oscillation de retour vers le zéro, à l'instant où la décharge s'effectue, celle-ci déterminerait toujours une excursion plus ou moins accentuée de l'aiguille de l'autre côté du zéro.

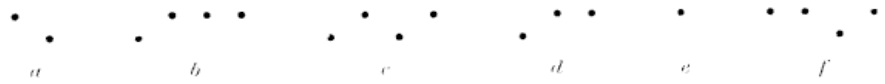
Lorsque des appareils très sensibles, tels que des récepteurs à miroir, sont installés dans des bureaux télégraphiques où aboutissent d'autres conducteurs, aériens surtout, qui exigent l'emploi de piles puissantes, des précautions particulières doivent être prises pour l'installation des fils de terre. Il arrive en effet alors qu'une partie, bien que très faible, de l'électricité, au lieu de s'écouler par les plaques de terre dans le sol, remonte dans la ligne sous-marine et trouble le jeu des miroirs. Ce cas s'est présenté, en 1875, aux deux extrémités du câble Marseille-Alger de 1871 ; à Marseille, cet effet a pu être évité facilement en soudant dans la guérite d'atterrissement les fils de fer de l'armature du câble souterrain, dont le parcours ne comprend pas moins de 5 kilomètres et qui servait de terre uniquement aux miroirs, aux fils de fer de l'armature du câble sous-marin. A Alger, où le terrain est plus sec, nous n'avons pu éviter la diffusion de l'électricité des différentes terres (plaques spéciales, conduites de distribution d'eau, etc). qu'en employant comme fil de terre de la ligne sous-marine le conducteur intérieur d'un câble armé, lequel se rendait directement à la mer, à 2 kilomètres environ de la station, et l'y reliant à une large plaque de cuivre.

Contrôle des transmissions

Lorsque l'on veut contrôler, au départ, les dépêches transmises, on fait usage de doubles clefs d'une forme spéciale due à M. Saunders. Ces clefs se composent de deux leviers Morse accouplés, dont l'extrémité postérieure porte un ressort en acier, isolé du levier principal par une feuille d'ébonite et mobile entre deux vis butoirs. Les communications sont établies comme l'indique la figure 420 ; si l'on abaisse la touche m_1 par exemple, le courant positif de la pile de ligne P charge le condensateur C, et un courant de même sens, émanant de la première moitié de la pile μ traverse le récepteur A de Siemens à double armature polarisée (fig. 421). L'abaissement de la touche m_2 déterminerait l'envoi d'une charge négative dans le condensateur C et d'un courant de même sens dans le récepteur A. L'une des deux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

armatures de l'appareil sera attirée dans le premier cas et imprimera une petite ligne bleue sur la bande ; la seconde armature produirait le même effet dans le second cas. On obtient ainsi deux séries de points ou de petits traits sur deux lignes parallèles à la bande ; les points de l'une des séries correspondent à ceux de l'alphabet Morse, ceux de l'autre série aux traits du même alphabet. Ce système d'écriture, dû à Steinheil, se lit aussi aisément que les caractères Morse.



Les commutateurs I sont à trois contacts : le contact intermédiaire est relié directement à la terre, de manière à permettre aux condensateurs de se décharger plus rapidement lorsque l'on passe de la position de transmission à celle de réception.

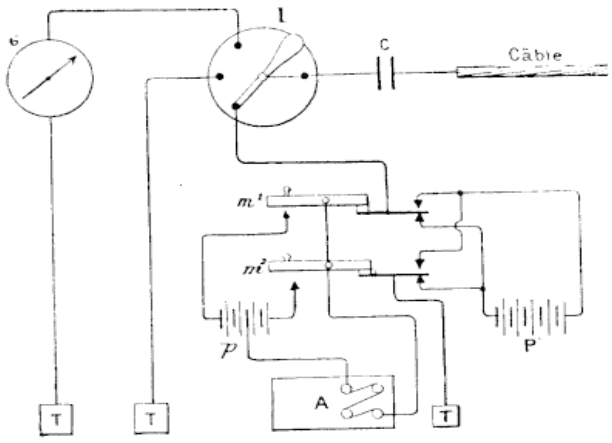


Fig. 420.

Sur les deux câbles atlantiques de Penzance à Canso, de 1881 et 1882, appartenant à l'*American telegraph and cable Company*, chaque condensateur C a une capacité de 130 microfarads. Il se compose de 13 caisses de 10 microfarads ; chaque caisse est elle-même divisée en 5 sections de 2 microfarads que l'on peut assembler de diverses manières selon les besoins. La pile de ligne P se compose de 10 éléments Siemens et Halske, d'une résistance intérieure considérable, mais dont la force électromotrice est très constante [1].

On a cherché aussi à utiliser le radiomètre de Crookes pour enregistrer les signaux produits par les récepteurs à miroir ; un appareil basé sur ce principe a figuré dans le pavillon du ministère du commerce de France à l'Exposition internationale d'électricité, à Vienne, en 1883 [2]. L'équipage mobile du radiomètre (fig. 422) ne comprend, dans ce cas, que deux ailettes dont les faces antérieures sont couvertes toutes deux de noir de fumée. Derrière la tige d'aluminium *a a'* qui réunit les deux ailettes, se trouvent deux fils

[1] *Die Einrichtung der Küstenstationen langer Unterseekabel*, von Dr Tobler. *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1884, p. 76.

[2] Max Jüllig. *Die Kabeltelegraphie*, p. 216.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de platine *b b′* ; ces fils traversent l'enveloppe de verre et aboutissent à deux des extrémités des bobines de deux électro-aimants Morse A A′ ; les deux autres extrémités de ces bobines sont reliées à une pile dont l'autre pôle est en communication avec le pivot métallique *c* de l'équipage mobile du radiomètre. L'appareil est placé devant un récepteur à miroir, de telle sorte

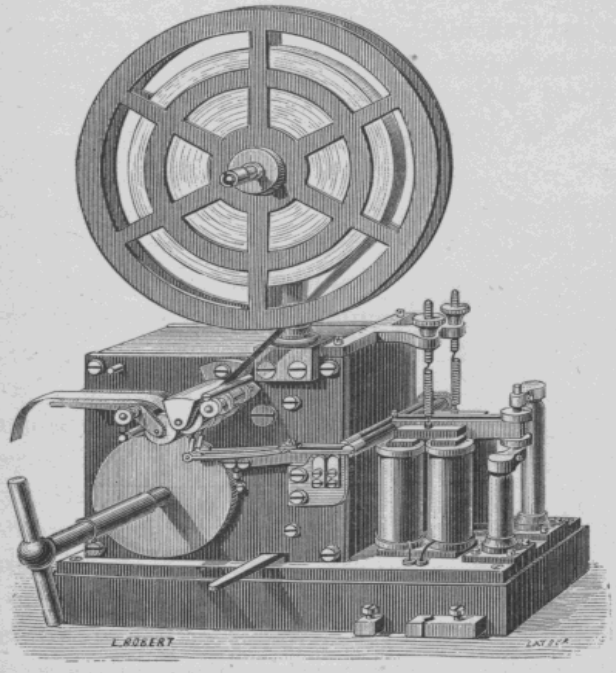


Fig. 421.

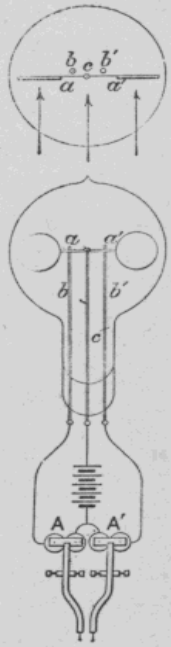


Fig. 422.

que l'index lumineux, lorsqu'aucun courant ne circule sur la ligne, tombe au milieu de l'intervalle qui sépare les deux ailettes. Si l'index dévie vers la droite, par exemple, l'ailette *a*' est repoussée, vient se mettre en contact avec le fil *b′*, et ferme le circuit de l'électro-aimant A′ dont l'armature est conséquemment attirée. Si les stylets des armatures des deux électro-aimants sont assez voisins pour que les signaux puissent être imprimés sur une même bande de papier, l'alphabet de Steinheil permet de les lire sans difficulté.

§ 3. — SIPHON RECORDER

Le *siphon recorder*, appelé souvent simplement *recorder* par abréviation, a été imaginé par sir W. Thomson en 1867, mais a subi depuis lors de nombreux perfectionnements. Il se compose aujourd'hui d'une bobine très légère de fil, délicatement suspendue entre les deux pôles d'un puissant électro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aimant, de manière à pouvoir tourner autour d'un axe vertical. La position de la bobine est réglée de telle sorte qu'à l'état de repos les plans du fil soient parallèles à la ligne N.-S. de l'électro-aimant. Lorsqu'un courant circule dans la bobine, les plans du fil tendent à se placer perpendiculairement à la ligne N.-S., et la bobine tourne d'un côté ou de l'autre, suivant le sens du courant.

Le mouvement de la bobine est transmis par des fils de soie à un siphon en verre extrêmement fin, mobile autour d'un axe horizontal ; l'une des extrémités de ce siphon plonge dans un réservoir d'encre, l'autre se trouve à une très petite distance d'une bande de papier qui se déroule d'un mouvement uniforme. L'encre étant en communication permanente avec une petite machine électrique et la bande de papier avec la terre, le liquide se trouve attiré et projeté sur la bande en une série de gouttelettes très fines. La succession rapide de ces gouttelettes y forme une ligne droite continue, suivant l'axe de la bande, lorsque la bobine est au repos dans sa position normale, et une ligne ondulée dont les sommets correspondent aux excursions extrêmes à droite et à gauche de la bobine, sous l'influence des courants positifs et négatifs qui la traversent (fig. 423). Les déviations au-dessus de la ligne médiane correspondant aux points et celles au-dessous de cette ligne aux traits de l'alphabet Morse, la lecture des signaux qui représentent exactement la courbe d'arrivée des courants est très facile lorsque chaque sommet est nettement accentué. On voit sur ces dessins[1], qui sont des fac-similés de signaux transmis sur le câble de Pernambouc à Saint-Vincent (1 844 milles marins), que lorsque plusieurs émissions de courants de même polarité se suivent, la succession de ces courants est assez rapide pour que la bobine ne puisse pas revenir, dans l'intervalle, à sa position d'équilibre stable, et qu'ainsi, comme nous l'avions annoncé plus haut, les signaux sont surtout produits par les premières parties des ondes électriques que lance dans le câble la station qui transmet.

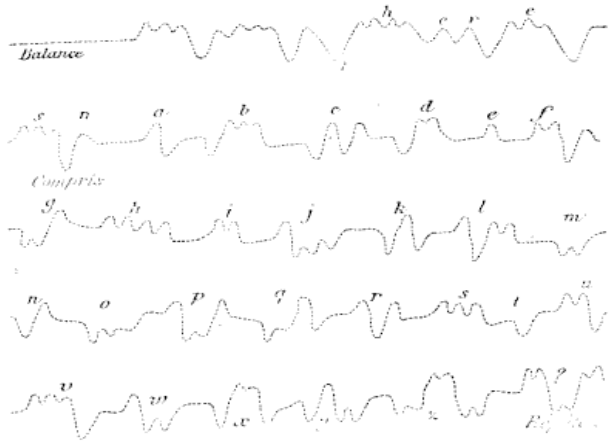


Fig. 423.

Nous allons étudier à présent plus en détail chacune des parties essen-

[1] J. Munro and A. Jamieson's *Electrical Rules and Tables*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tielles de l'appareil, en suivant principalement l'excellente description qui en a été donnée par M. le Dr Tobler [1].

Bobine et électro-aimant.

La bobine S (fig. 424) est formée de 20 spires de fil de cuivre de 0,08 millimètre de diamètre recouvert de soie ; ces spires, enroulées dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, sont collées les unes aux

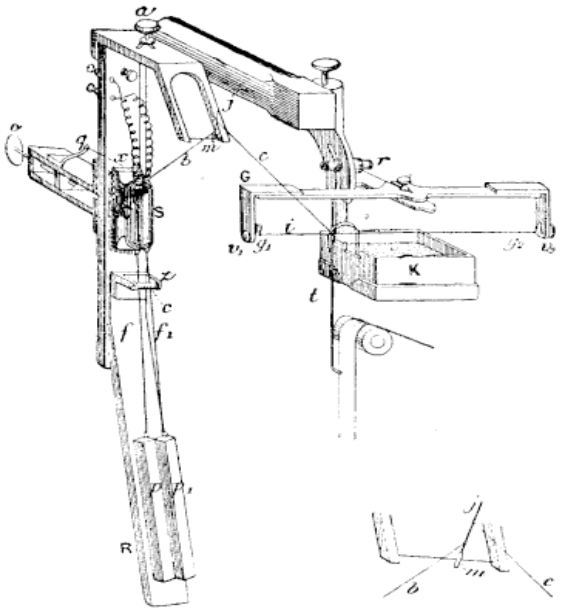


Fig. 424.

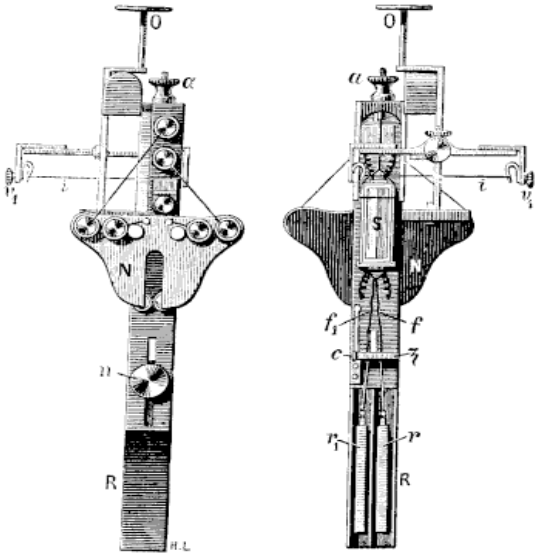


Fig. 425.

autres, et forment un ensemble assez rigide pour qu'il ne soit pas nécessaire de le soutenir par un cadre. Afin de pouvoir utiliser l'appareil pour la transmission duplex, un second fil est généralement joint au premier ; les extrémités des deux circuits sont soudées à de petits boudins dont les bouts libres sont engagés dans quatre bornes (fig. 425) séparées par une plaque d'ébonite N des montants de l'instrument ; le fil des boudins est assez fin pour que le mouvement de la bobine n'en puisse éprouver un ralentissement sensible. La résistance électrique de chaque circuit est d'environ 250 ohms. Lorsque l'on travaille en simple, on réunit par un fil métallique deux des bornes de telle sorte que le courant traverse successivement les deux circuits et dans le même sens.

La bobine est suspendue à un fil de soie fin dont la longueur peut être

[1] Sir W. Thomson's Heberschreibapparat. *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1885, p. 285.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

réglée à l'aide de la vis a. Deux fils f et f_1 attachés à ses deux angles inférieurs (fig. 424), traversent une pièce z, en frottant contre le cylindre c et sont tendus par deux poids p et p_1 de 25 grammes environ chacun, mobiles le long du plan incliné R. La pièce z est mobile dans de certaines limites,

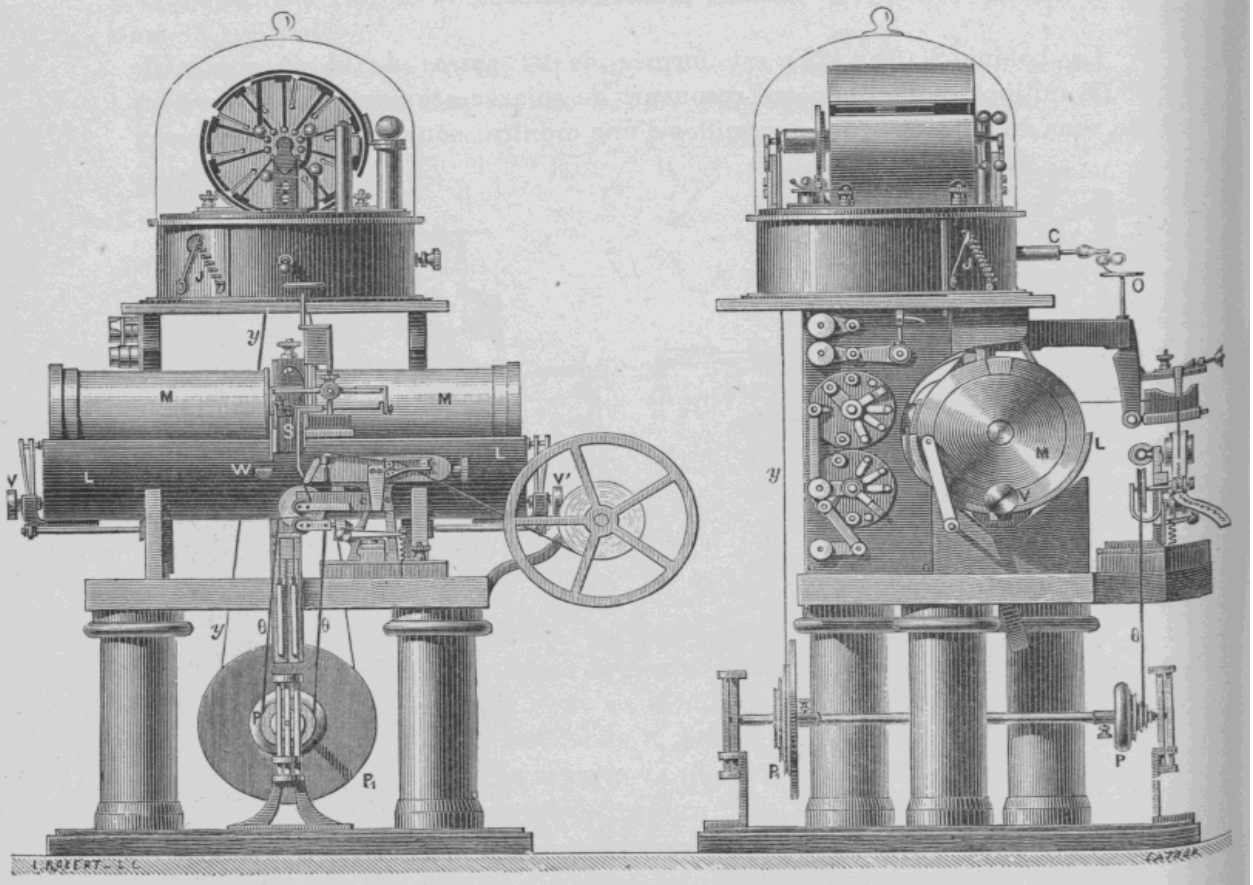


Fig. 426 et 427.

le long du montant de l'appareil et peut être fixée, au point convenable, à l'aide de la vis de pression n (fig. 425). Ce mode de suspension ramène la bobine, après le passage d'un courant, dans un azimuth déterminé ; si on relève la pièce z, la durée d'une oscillation de la bobine est diminuée ; elle est augmentée dans le cas contraire.

Deux gros électro-aimants M (fig. 426 et 427) actionnés par une pile locale reposent sur une pièce semi-circulaire en fer L qui est en contact direct avec les deux armatures : les deux électro-aimants n'en forment ainsi qu'un seul, le courant de la pile locale parcourant le fil qui les enveloppe dans un sens tel qu'il se forme deux pôles de noms contraires aux extrémités

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des armatures placées en regard l'une de l'autre. La bobine S se trouve dans l'espace qui reste libre entre ces deux armatures et qui constitue un champ magnétique très intense. Les vis V et V′ permettent de rapprocher ou d'écarter les deux bobines M de l'électro-aimant de la bobine mobile S. La pile qui actionne les électro-aimants est divisée en deux moitiés que le commutateur H (fig. 428) permet d'introduire séparément, ou réunies, dans le circuit. Une pièce de fer doux e', invariablement fixée à l'un des montants du bâtis, est placée au centre de la bobine S, de manière à augmenter encore l'intensité du champ magnétique dans lequel cette dernière se trouve déjà.

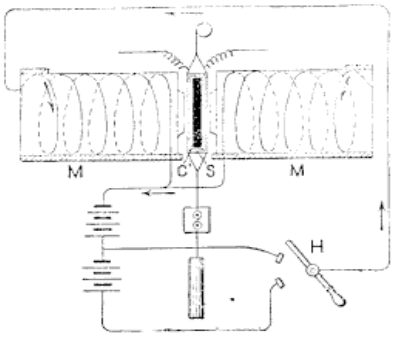


FIG. 428.

Une sorte de porte W (fig. 426) donne, en cas de besoin, un accès facile à la plaque N et permet de visiter et de réparer rapidement toutes les parties délicates du mécanisme.

Siphon; inscription des signaux.

Le siphon que la figure 429 représente en grandeur naturelle, est un tube en verre très fin, recourbé deux fois à angle droit dans le voisinage de l'une de ses extrémités et à 130° à 5 ou 6 millimètres de l'extrémité opposée. Ce tube étant très fragile, il est nécessaire de pouvoir le remplacer facilement sans l'intervention du constructeur. A cet effet, on choisit un tube de verre de 6 à 7 millimètres de diamètre et dont les parois ont un millimètre d'épaisseur environ. On en chauffe la partie centrale sur une longueur de 25 à 30 millimètres, au-dessus de la flamme d'un bec de gaz, en ayant soin de tourner constamment le tube sur lui-même. Lorsque le verre est suffisamment ramolli, on l'étire par ses deux bouts jusqu'à ce qu'il soit réduit au diamètre voulu: après refroidissement, on le coupe en pièces de 10 à 11 centimètres de longueur.

FIG. 429.

Pour faire un siphon de l'une de ces pièces, il suffit de mettre le point où le tube doit être replié en contact avec la base de la flamme d'une allumette. L'extrémité du tube ne tarde pas à retomber, par son propre poids, sur celle que l'on tient à la main: on achève de lui donner la courbure voulue. On coupe au ciseau le bout inférieur, s'il est trop long, et on use la cassure sur une pierre à émeri, de manière à obtenir une pointe fine et douce qui puisse être approchée très près du papier, sans l'accrocher.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le siphon t ainsi préparé est fixé, à l'aide d'un peu de cire blanche, sur une sorte de selle en aluminium Q (fig. 424 et 430), liée elle-même à un fil de platine i. Le fil i est tendu entre deux ressorts g_1 et g_2, et peut recevoir une légère torsion dans un sens déterminé, à l'aide des vis v_1 et v_2. L'extrémité supérieure du siphon plonge dans le réservoir d'encre K qui est isolé, par une plaque d'ébonite, de la masse de l'appareil, et en communication métallique avec le disque O (fig. 426 et 427).

L'encre dont on fait usage de préférence est un bleu d'aniline obtenu en faisant dissoudre dans un demi-verre d'eau la quantité de cristaux qui peut tenir sur la pointe d'un canif. Cette encre, d'un beau bleu foncé, est parfaitement fluide, ne s'épaissit pas, ne forme pas de dépôts, et peut se produire en très petites quantités.

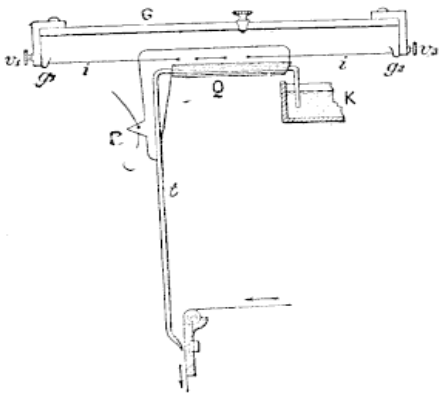


Fig. 430.

Les mouvements de la bobine S sont transmis au syphon t par l'intermédiaire de deux fils de soie b et c (fig. 424), attachés le premier à l'angle droit supérieur de la bobine et au milieu du levier j, le second à l'extrémité supérieure de ce même levier j et en un point D de la selle en aluminium Q (fig. 430).

Les mouvements de la bobine sont amplifiés dans le rapport des longueurs des deux bras du levier i, lequel est mobile autour du point m; on lui donne le nom de *multiplicateur*. Derrière la bobine (fig. 424), en regard du point d'attache du fil b, est fixé un autre fil de soie x tendu par un ressort q ; ce ressort est supporté par une glissière qui peut être déplacée dans un sens ou dans un autre, à l'aide de la vis e. La tension du ressort q se règle d'après le degré de torsion du fil i; on manœuvre la vis e dans le sens convenable, de manière à amener la pointe du siphon, lorsqu'aucun courant ne traverse la bobine, en regard du milieu de la bande de papier. Le jeu du siphon sollicité en sens inverse par ces deux forces antagonistes et le mouvement de la bobine est dès lors facile à concevoir.

Le cadre G à l'intérieur duquel est tendu le fil de platine i peut se déplacer légèrement de bas en haut ou inversement. On le fixe à l'aide de la vis de pression r, en un point tel que la pointe du siphon soit à une bonne distance de la bande de papier. Lorsque l'appareil ne doit pas fonctionner pendant quelques heures, il est prudent, pour éviter un engorgement du siphon, d'en retirer l'extrémité supérieure du réservoir d'encre. A cet effet, on desserre la vis r, et on soulève avec précaution le châssis G : le guide dans lequel glisse pendant ce mouvement la vis a une forme telle que la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tension du fil c ne s'en trouve pas augmentée d'une manière appréciable. Si l'encre était accidentellement desséchée à l'intérieur du siphon, on nettoierait le tube en le trempant dans l'acide sulfurique. La bande de papier, en sortant du rouet R (fig. 431), est tendue en passant sous un ressort α, contourne le rouleau guide β qui lui donne une direction verticale e

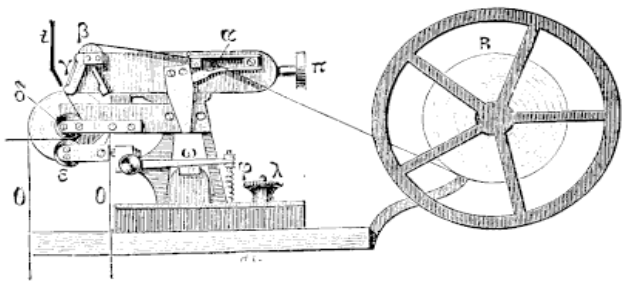


Fig. 431.

arrive sur une plaque γ légèrement bombée, placée en face de la pointe du siphon ℓ. Elle est saisie entre les rouleaux-laminoirs δ et ε, dont le premier reçoit un mouvement de rotation de la machine magnéto-électrique par l'intermédiaire de la corde θ et des poulies à diamètre variable P, et dont le second est pressé contre δ par le ressort φ et le levier coudé ω. Des vis π et λ permettent la première de rapprocher ou d'éloigner la bande de papier de la pointe du siphon, la seconde de régler la tension du ressort.

La meilleure corde à employer pour la transmission du mouvement est la corde à fouet: en la nouant par un nœud dont les bouts sont coupés(fig. 432), la corde passe sans secousse sur les poulies et ne s'allonge jamais. Une légère variation dans la longueur de la corde n'offrirait d'ailleurs aucun inconvénient, les poulies P n'ayant pas d'autre support que la corde elle-même.

Fig. 432.

Un papier trop sec offrant une trop grande résistance au passage de l'électricité, on fait usage de papier trempé dans une solution de 2 parties de nitrate d'ammoniaque dans 100 parties d'eau[1]. Le papier une fois séché, se maintient légèrement humide par la déliquescence du sel qu'il contient. Souvent on se contente de disposer à l'avance les rouleaux de papier que l'on doit employer prochainement au-dessus de vases remplis d'eau où ils acquièrent le degré d'humidité exactement nécessaire.

Moulinet électrique

Le moulinet constitue à la fois une machine électro-magnétique et un

[1] Ternant. *Le Siphon enregistreur*, 1882.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

générateur d'électricité statique construit d'après le type des machines de Varley. Le moteur électro-magnétique détermine le déroulement de la bande de papier ; le générateur d'électricité statique sert à électrifier l'encre qui, du réservoir K, doit être projetée à travers le siphon t sur la bande.

Cet organe, placé à la partie supérieure de l'appareil, se compose (fig. 433) d'un plateau en ébonite E porté par un axe X qui repose sur des rouleaux à demi immergés dans des bains d'huile, de manière à diminuer le frottement.

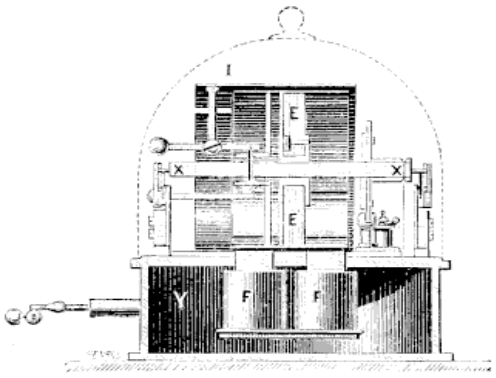


Fig. 433.

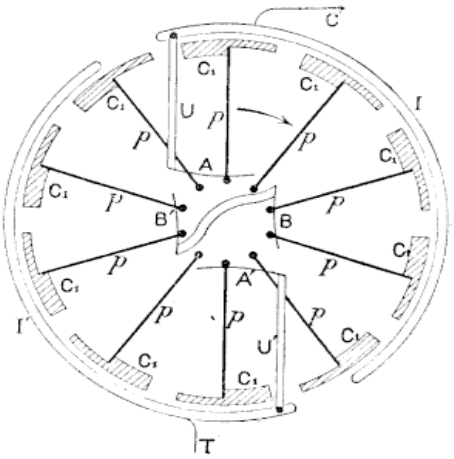


Fig. 434.

Sur la périphérie du plateau (fig. 434) sont réparties à des intervalles égaux dix pièces en fer doux C_1, dont la surface extérieure est parallèle à celle du plateau, isolées les unes des autres, mais en contact avec dix tiges métalliques p. Les têtes arrondies de ces tiges sont placées à des distances de l'axe de rotation exactement égales et peuvent venir se mettre successivement en contact avec quatre ressorts en acier A, A′, B, B′. Les ressorts A et A′ sont reliés par l'intermédiaire des tiges en cuivre U et U′ à deux pièces en fer, fixes, semi-cylindriques I et I′, qui enveloppent presque complètement la partie mobile du moulinet et qui constituent les *inducteurs* : le premier est en communication avec le conducteur C, le second avec la terre, par l'intermédiaire de la masse de l'appareil. Les ressorts B et B′ sont reliés métalliquement entre eux, mais isolés du reste de l'appareil.

Le jeu de la machine électrique de Varley ayant été exposé plus haut, on voit que si l'on communique à l'une des pièces C_1 une charge électrique, si faible qu'elle soit, et si l'axe X du moulinet reçoit ensuite un mouvement de rotation continu, la charge de l'inducteur I croîtra très rapidement. Il est même nécessaire de recouvrir de paraffine les pièces C_1 et les inducteurs, pour prévenir les étincelles qui ne tarderaient pas à éclater entre eux.

Le mouvement de l'axe X est obtenu automatiquement de la machine

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électro-magnétique. A cet effet, sous le moulinet, dans une boîte Y, se trouve un électro-aimant F en fer à cheval qui est actionné par une pile locale dont le circuit est tantôt fermé, tantôt ouvert. La hauteur des deux noyaux de l'électro-aimant F est réglée d'après la longueur des pièces C_1. Dès que le circuit de la pile locale est fermé, l'électro-aimant F attire la pièce C_1 la plus voisine ; le courant est interrompu lorsque l'armature C_1 a dépassé les pôles de l'électro-aimant, mais le mouvement se continue encore un instant en vertu de la vitesse acquise. L'armature suivante se rapprochant alors de l'électro-aimant, le circuit est fermé de nouveau, cette seconde armature C_1 est attirée à son tour et le mouvement de tout le système se continue indéfiniment.

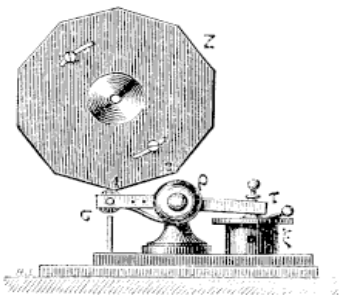


FIG. 435.

Pour réaliser les fermetures et ouvertures automatiques du circuit aux instants précis demandés, on dispose sur l'axe X, derrière les inducteurs, un plateau Z taillé en forme de décagone régulier (fig. 435).

Sous ce plateau, se trouve un levier $\sigma\tau$, mobile autour d'un axe ρ ; l'extrémité antérieure σ du levier porte un petit rouleau qui frotte contre la jante du plateau, son autre extrémité τ est traversée par une vis terminée par une pointe en platine qui repose sur un petit tambour ξ. Le plateau Z étant entraîné avec l'axe X dans son mouvement de rotation, laisse le levier $\sigma\tau$ dans la position indiquée par la figure aussi longtemps que le rouleau σ se trouve en contact avec la partie centrale de l'un des côtés du décagone : pendant tout ce temps, le circuit de la pile locale est fermé. Lorsqu'un sommet tel que celui marqué 1 arrive dans le voisinage du rouleau, il force celui-ci à s'abaisser : le levier $\sigma\tau$ bascule et rompt en τ le circuit local. Si donc le plateau Z a été calé sur l'axe X de telle sorte que le levier $\sigma\tau$ commence à se soulever à l'instant où une armature C_1 s'éloigne des pôles de l'électro-aimant, l'interruption de courant se produira exactement comme nous le supposions plus haut. Le plateau Z entraîné avec le reste de l'appareil en vertu de sa vitesse acquise, fera dépasser le sommet 1 au rouleau σ lequel revenant ensuite en contact avec le côté 1 — 2 du décagone permettra au levier $\sigma\tau$ de reprendre sa position normale. Le contact de la pile locale se refermera donc en τ, et les mêmes phénomènes se reproduisant pour chaque côté du plateau Z, le mouvement de l'appareil sera continu.

Les étincelles qui éclatent entre l'extrémité τ du levier $\sigma\tau$ et le tambour ξ finissant par percer la plaque qui recouvre ce dernier, on l'a rendue mobile à l'aide d'une manivelle, de manière à pouvoir, en cas de besoin, présenter en regard de la pointe τ une partie de surface encore intacte.

Une corde à fouet y (fig. 426 et 427) transmet le mouvement de l'axe X à l'une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des poulies à diamètre variable P, placées sur le même axe que les poulies P, lesquelles commandent, comme nous l'avons vu, le déroulement du papier.

Le commutateur J permet d'introduire dans le circuit de l'électro-aimant F des résistances graduées afin que l'on puisse faire varier à volonté la vitesse de rotation du moulinet. A la résistance supplémentaire la plus faible correspond naturellement la plus grande vitesse.

Du conducteur C l'électricité se rend au disque O, en traversant soit une pointe que l'on fixe à C, en la maintenant à une distance convenable de O, soit une bande de papier plus ou moins humide que l'on attache au conducteur C et qui repose sur le disque O. Ce disque étant relié, ainsi que nous l'avons vu, au réservoir d'encre K, l'électricité, après avoir traversé le siphon et la bande de papier, se rend à la terre par la plaque γ qui fait partie de la masse métallique de l'appareil.

Le passage de l'encre dans le siphon ne se produisant plus que très difficilement dès que l'humidité ambiante dépasse une certaine limite, à cause de la déperdition d'électricité statique par l'air et les supports, M. Cuttriss a imaginé d'entretenir le mouvement vibratoire du siphon à l'aide d'actions électro-magnétiques [1]. A cet effet l'extrémité du tube en verre porte une petite pointe tirée d'un fil de fer très fin et séparée de l'armature d'un électro-aimant par l'épaisseur du papier seulement. Un vibrateur spécial détermine l'aimantation et la désaimantation de l'électro-aimant, à des intervalles réguliers, égaux à ceux auxquels se succèdent les fermetures et ruptures du courant excitateur. Le siphon, entraîné par la pointe de fer, vibre à l'unisson de l'armature de l'électro-aimant et trace sur la bande de papier une ligne formée d'une série de petits points très rapprochés.

Installation de l'appareil et communications dans les postes de départ et d'arrivée.

Le contrôle, dans chaque poste, de ses propres transmissions présentant de l'intérêt au point de vue de l'exploitation des câbles, le courant qui fait fonctionner l'appareil à l'extrémité éloignée de la ligne traverse également celui du poste de départ. En raison toutefois de l'extrême délicatesse du siphon recorder, une très faible partie seulement du courant de ligne traverse l'appareil au départ. Une caisse de résistances à curseur simple R_1, qui constitue une dérivation à la bobine S du recorder (fig. 436), est placée sur le côté gauche de l'un des montants de l'appareil ; on ne l'introduit que dans le circuit du poste transmetteur. La plus grande des résistances qui la composent est de 8 ohms.

[1] *Lumière électrique*, Vol. XXI, 1886 et XXVII, 1888.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Une autre caisse R_2 qui ne comprend, au contraire, que des résistances supérieures à 500 ohms, forme une seconde dérivation à la bobine S : elle a pour objet principal d'en amortir plus rapidement les oscillations. Ce shunt permettant en effet aux courants d'induction qui naissent dans la bobine, lorsque celle-ci se déplace dans le champ magnétique dû aux deux

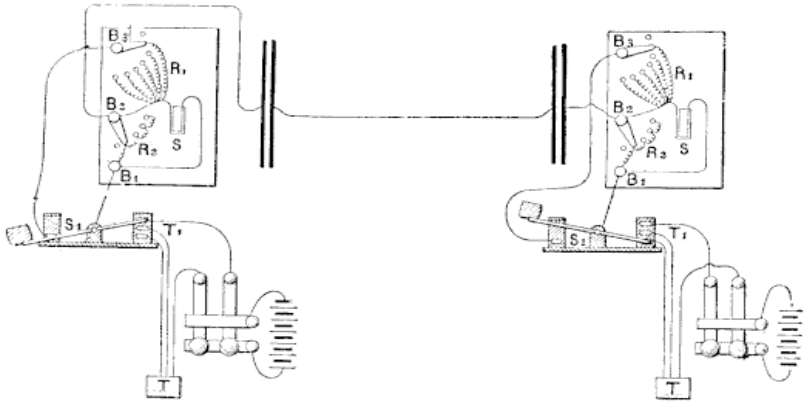


FIG. 436.

gros électro-aimants, de circuler dans un circuit fermé, ces courants, d'après la loi de Lenz, tendent à s'opposer au mouvement de la bobine.

Un commutateur, d'une forme spéciale, composé d'un levier en cuivre mobile autour d'un axe horizontal, est placé entre le récepteur, la terre et la pile : on le manœuvre chaque fois que l'on passe de la position de transmission à celle de réception, ou inversement. Le contact intermédiaire T_1 permet au câble, dans le premier cas, de se décharger presque directement à la terre pendant un instant, en ne traversant que la résistance toujours très faible du rhéostat R_1 ; la hauteur des divers contacts est, dans ce but, calculée de telle sorte que le levier, en basculant, touche T_1 avant d'avoir quitté complètement S_1.

Les communications étant établies comme l'indique la figure 436, si, au poste de gauche, qui est dans la position de transmission, on abaisse l'une des touches de la clef de la pile, le courant se bifurque dans le commutateur en deux fractions très inégales dont l'une, la plus faible, arrive en B_1, l'autre, la plus forte, en B_3. La première se divise elle-même au point B_1 en deux parties qui traversent, l'une la bobine S, l'autre le shunt R_2. Ces deux fractions se réunissent en B_2, où elles retrouvent la partie du courant qui a traversé le rhéostat R_1. On peut ainsi diminuer autant que l'on veut l'intensité du courant qui circule dans la bobine du *recorder ;* le courant entier se rend ensuite au condensateur qui précède immédiatement le câble.

Au poste d'arrivée, le levier du commutateur étant soulevé, le courant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ne peut traverser, pour se rendre à la terre, que la bobine S et son shunt R_2.

Les pôles des deux piles de ligne sont inversés dans les deux postes afin que les signaux correspondent à des déviations de même sens, quel que soit le poste transmetteur.

Quelquefois, on envoie directement à la terre la petite portion du courant qui, au départ, traverse la bobine S. Les communications sont alors établies comme l'indique la figure 437. Au poste de départ, le circuit est ouvert au contact n° 1, et fermé aux contacts n^{os} 2 et 3 dont les chevilles

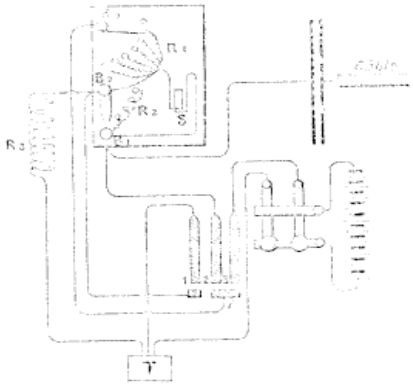


Fig. 437.

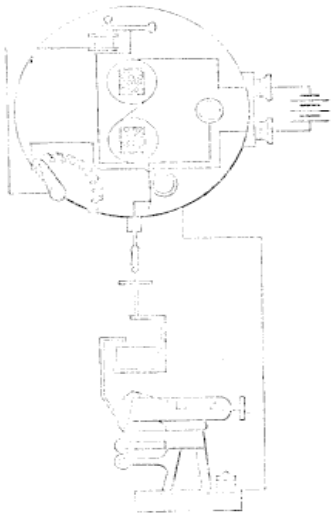


Fig. 438

sont en place ; au contraire, au poste d'arrivée, le circuit est fermé en 1 et ouvert en 2 et 3 ; une résistance auxiliaire R_3 de 5 000 ohms ou plus, suivant les cas, relie, en outre, la borne B_2 à la terre. Le courant, au départ, se divise au point *i* en deux fractions qui arrivent simultanément en B_1 et B_3 ; une nouvelle division se produit au point B_1, la plus grande partie se rend dans le condensateur, la plus faible traverse la bobine S et, le cas échéant, son shunt R_2 pour se réunir en B_2 au courant qui a traversé le rhéostat R_1 ; ces deux dernières portions s'écoulent ensuite à la terre à travers la résistance R_3. Au poste d'arrivée, le courant traverse la bobine S et le rhéostat R_2 formant dérivation et s'écoule à la terre en passant par le contact n° 1.

On fait usage en général pour la pile de ligne d'éléments Callaud, Minotto ou Siemens-Halske. Pour les piles locales, il est préférable d'employer les piles à auge à grande surface, présentant la même composition que la pile Daniell, que sir W. Thomson a fait construire spécialement à cet effet, et dont la résistance, par élément, ne dépasse pas 0,1 ohm. Trois de ces éléments suffisent ordinairement pour faire fonctionner le moulinet, et neuf

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour donner une intensité convenable au champ magnétique dans lequel est placée la bobine S du *recorder*.

Le nombre d'éléments employés aux transmissions varie nécessairement avec la longueur de la ligne. Entre Marseille et Malte, pour une distance de 834 milles marins, 4 à 5 éléments suffisent. On en emploie de 8 à 10 sur la section de Malte à Alexandrie, qui compte 927 milles marins [1].

Depuis quelques années, sir W. Thomson a fait construire, pour des câbles de longueur moyenne, des *siphons-recorders* dans lesquels les électro-aimants M sont remplacés par des aimants permanents et où le moulinet est complètement supprimé, en dispensant ainsi de l'emploi des rhéostats R_1 et R_2 et des deux piles locales (fig. 438). Le siphon doit avoir un diamètre un peu plus considérable afin que l'écoulement de l'encre se fasse sous l'action de la pesanteur, sans l'attraction contre la bande de papier déterminée par la charge électrique qui lui est communiquée dans les appareils plus complets. Un mouvement d'horlogerie produit alors le déroulement de la bande.

Clef de Smith.

Le commutateur à levier de sir W. Thomson est remplacé parfois par un appareil (fig. 439) dû à M. B. Smith, donnant exactement les mêmes communications, mais d'une forme plus élégante. Une croix à quatre branches, montée sur le même axe vertical qu'un levier terminé par une poignée, peut venir s'appuyer contre des butoirs munis de pièces de contact. Les communications sont établies comme le montre la figure 440 : dans la position indiquée par le dessin, la ligne est mise directement à la terre par l'intermédiaire du commutateur de Smith. L'appareil est sur la position de transmission lorsque le levier est tourné à gauche, et sur la position de réception lorsque le levier est tourné à droite.

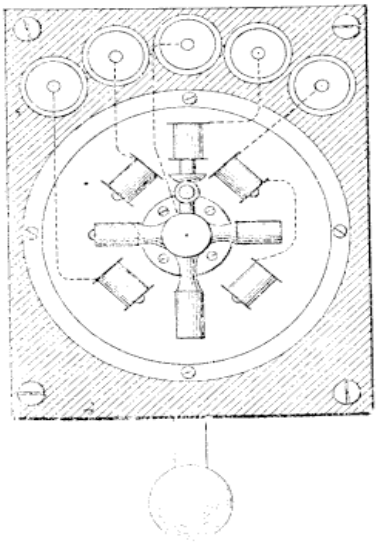


Fig. 439.

Le condensateur, au lieu d'être placé entre la ligne et le récepteur, se trouve dans cette installation entre le récepteur et la terre : les signaux reçus arrivent seuls dans ce cas au condensateur. Il semble résulter de cet arrangement que le câble et le condensa-

[1] Ternant. *Le Siphon enregistreur*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teur restent à des potentiels toujours à peu près égaux : la pratique constate que le travail des transmissions en est facilité. Le petit commutateur c' qui

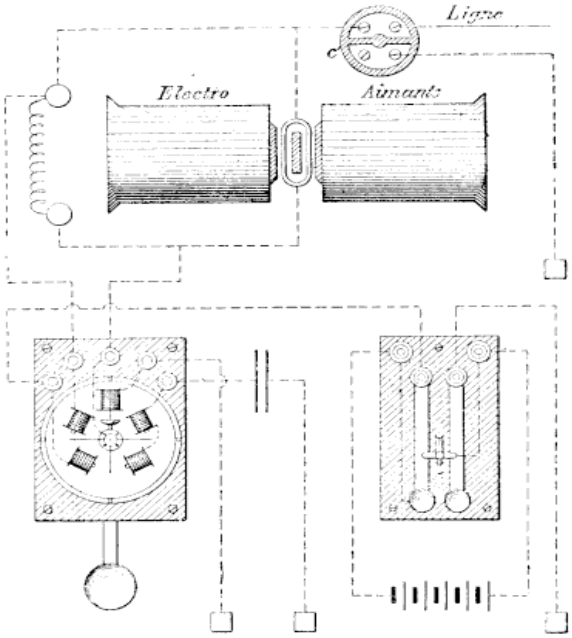


Fig. 440.

vient immédiatement à la suite du câble, est destiné à mettre la ligne à la terre en dehors de tous les appareils, soit en cas d'orage, soit pour des expériences.

Clef de Dickenson.

La clef de Dickenson[1], employée par la *Compagnie générale allemande des télégraphes*, sur la ligne d'Emden à Valentia dont la longueur est de 894 milles marins, comprend à la fois un manipulateur inverseur et un commutateur : ce dernier est manœuvré chaque fois que l'on passe de la position de transmission à celle de réception ou réciproquement.

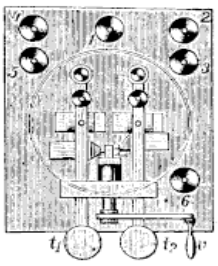


Fig. 441.

Le manipulateur inverseur se compose de deux leviers ordinaires de manipulateur t_1 et t_2 (fig. 441) complètement indépendants l'un de l'autre ; leurs butoirs de repos sont reliés entre eux et à la borne n° 2 ; leurs butoirs de travail, sur lesquels ils viennent s'appuyer

[1] Dr Zetzsche. *Handbuch der elektrischen Telegraphie*, vol. III, p. 565.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lorsque l'on presse sur les touches qu'ils portent à leur extrémité antérieure, sont de même reliés entre eux et à la borne n° 3.

Dans l'intervalle libre entre les deux leviers se trouve le commutateur composé d'un axe horizontal que l'on peut faire tourner à l'aide d'une manivelle v (fig. 442) et qui est enveloppé d'un excentrique m en ébonite. Au-dessus de l'excentrique est fixée une pièce métallique formant une sorte de pont en communication avec la borne n° 1, et contre laquelle viennent frotter, lorsqu'ils n'en sont pas éloignés par la partie la plus évasée de l'excentrique, trois ressorts isolés les uns des autres et placés l'un à gauche, les deux autres à droite : le ressort de gauche est relié à la borne n° 5, le ressort antérieur de droite à la borne n° 6 et le ressort postérieur à l'axe de rotation du levier t_2 ; l'axe de rotation du levier t_1 est lui-même relié à la borne n° 4. Dans la position indiquée par notre dessin, les deux ressorts de droite sont écartés du pont par l'excentrique et restent isolés ; le ressort de gauche est au contraire en contact avec la pièce métallique. Si l'on tourne la manivelle v de 180°, c'est le ressort de gauche qui

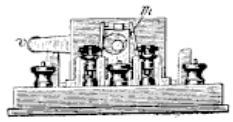


Fig. 442.

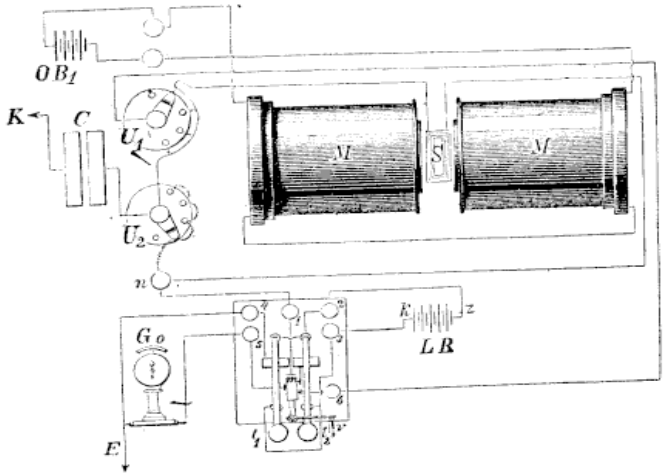


Fig. 443.

est isolé par l'excentrique et les deux ressorts de droite qui sont en communication avec le pont. Pendant que s'effectue ce mouvement de rotation, il existe un instant, très court en général si la manivelle est tournée brusquement, durant lequel les trois ressorts s'appuient à la fois sur le pont : cette disposition, ainsi qu'on le verra un peu plus bas, facilite la décharge du câble.

Tout l'appareil, à l'exception de la manivelle et des touches des leviers t_1 et t_2, est enfermé dans une boîte ronde en laiton recouverte d'une glace.

Les communications sont établies comme l'indique la figure 443 dans laquelle U_1 et U_2 représentent deux rhéostats à curseurs comprenant 4 bobines

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chacun ; les résistances des bobines du rhéostat U_1 sont respectivement de 1, — 1,5, — 2 et 3 ohms ; chaque bobine de U_2 a uniformément 500 ohms de résistance. Ce dernier rhéostat, comme on l'a déjà vu, a pour but d'amortir les oscillations de la bobine S du recorder ; l'amortissement le plus énergique est obtenu en ne mettant en circuit qu'une seule des bobines de U_2, l'amortissement le plus faible en y introduisant les quatre bobines à la fois. Le courant, au départ, traverse d'ailleurs, au moins en partie, la bobine S, de manière à faciliter le contrôle des transmissions.

Le commutateur se trouvant dans la position de réception qui est celle représentée par nos dessins, si une charge électrique arrive par le câble K dans le condensateur C, une charge d'électricité de même nom est mise en liberté sur l'armature opposée du condensateur. Cette charge se divise dans le rhéostat U_2 en deux parties ; l'une d'elles traverse les bobines de U_2 qui sont dans le circuit et arrive en *n* ; l'autre passe par la bobine S et rejoint en *n* la première partie ; comme la résistance de la bobine S est d'ailleurs au plus égale à celle de l'une des bobines de U_2, la moitié au moins du courant total traverse la bobine du recorder. Les deux fractions réunies se rendent ensuite à la borne n° 1, par le pont du commutateur au ressort de gauche, à la borne n° 5, au récepteur à miroir G_0 et enfin à la terre. Le récepteur G_0 n'a d'utilité qu'en cas d'avarie du recorder ; en temps ordinaire on le met hors circuit à l'aide d'une cheville que l'on introduit entre les bornes 4 et 5.

Si l'on passe à la position de transmission en tournant la manivelle *v*, on voit d'abord qu'à l'instant où les trois ressorts sont simultanément en contact avec le pont, le câble se trouve, par l'intermédiaire du condensateur C, en communication directe avec la terre : l'électricité qu'il pourrait contenir encore trouverait donc ainsi un écoulement facile. Supposons maintenant que l'on abaisse la touche du levier t_2 ; le courant négatif de la pile de ligne LB, partant du pôle Z, arrive à la borne n° 2, au butoir de repos du levier t_2, à celui du levier t_1, par l'intermédiaire de ce levier et de son axe de rotation, à la borne n° 4 et à la terre E. Le courant positif, partant du pôle K, arrive à la borne n° 3, au butoir de travail du levier t_2, par l'intermédiaire de ce levier et de son axe de rotation, au ressort postérieur de droite et au pont contre lequel appuient maintenant les deux ressorts de droite. En ce point le courant se divise en deux parties : l'une traverse la borne n° 4 et celle *n*, où une nouvelle division s'opère, une fraction du courant passant dans les bobines du rhéostat U_2 qui sont dans le circuit, l'autre traversant la bobine S pour rejoindre la précédente à l'axe de rotation du rhéostat U_2 ; la seconde partie du courant principal partant du pont, arrive par le ressort antérieur de droite à la borne n° 6, au rhéostat U_1 et enfin à l'axe de rotation de U_2. Le courant ainsi intégralement reconstitué se rend

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au condensateur C qui précède le câble. La résistance en circuit dans le rhéostat U_1 étant toujours très faible, la majeure partie du courant suit cette voie au départ ; la bobine du recorder ne reçoit donc que des courants d'une intensité analogue à celle des courants que lui envoie le poste correspondant.

Si l'on abaisse la touche du levier t_1, l'effet produit est absolument semblable, mais de sens inverse.

La pile O B_1 est une pile locale qui actionne les électro-aimants M.

ONDULATEUR DE LAURITZEN

Cet appareil, analogue au *recorder* de sir W. Thomson, est surtout employé sur les lignes sous-marines de la *Great Northern Telegraph Co*. Il se compose essentiellement de quatre électro-aimants droits disposés aux sommets d'un carré et dans un même circuit les uns à la suite des autres (fig. 444) ; l'enroulement du fil est de même sens pour les bobines situées

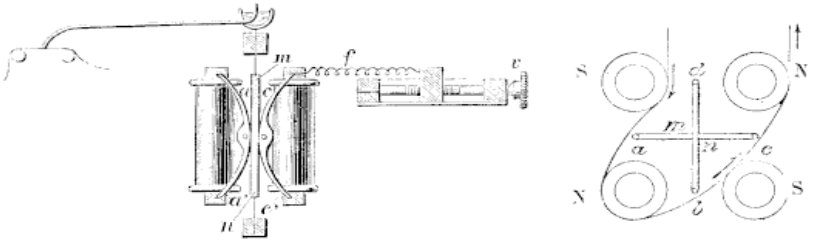


Fig. 444.

sur une même diagonale, mais inverse pour celles situées sur des diagonales différentes ; les pôles développés aux extrémités supérieures, par exemple, des noyaux, par un même courant, seront nord pour ceux placés sur la diagonale N N et sud pour ceux placés sur la diagonale S S.

Dans l'espace libre entre les quatre électro-aimants se trouvent quatre aimants aa', bb', cc', dd', en acier, très légers, réunis en leur milieu à une tige $m\,n$, mobile entre deux pivots avec aussi peu de frottement que possible : a, c, b' et d' ont des polarités semblables et opposées à celles des quatre pôles a', c', b et d. Un ressort f dont la tension peut être réglée à l'aide d'une vis v tend à ramener toujours la partie mobile de l'appareil dans un azimuth déterminé.

Si un courant traverse les bobines des quatre électro-aimants, les actions exercées par les noyaux sur les aimants permanents s'ajoutent pour faire tourner l'équipage mobile dans un sens déterminé par la direction même du courant. Si donc la tige $m\,n$ est liée à un tube très fin d ux fois recourbé, dont l'une des extrémités plonge dans un réservoir d'encre et dont l'autre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

appuie légèrement sur une bande de papier mue par un mouvement d'horlogerie, les signaux tracés par la pointe du tube sur le papier seront exactement semblables à ceux du *recorder*.

La résistance des quatre bobines est d'environ 1 000 ohms. La sensibilité de l'appareil est telle que dans un circuit de 30000 ohms on obtient encore des signaux compréhensibles avec un seul élément Leclanché.

Employé surtout sur des lignes de longueur moyenne (de 350 à 700 milles marins), l'ondulateur donne une vitesse de transmission de 400 lettres par minute [1].

§ 4. — TRANSMISSIONS DUPLEX SUR LES CABLES SOUS-MARINS

Le problème de la transmission duplex consiste à rendre insensible au courant de chaque poste le récepteur correspondant, tout en faisant reproduire fidèlement par cet appareil les signaux émanant de la pile du poste éloigné. Ce problème a reçu jusqu'à présent deux solutions principales dans l'une ou l'autre desquelles rentrent toutes les méthodes particulières proposées par les divers inventeurs : 1° le système différentiel, dont le principe dû au Dr Gintl, de Vienne, fut perfectionné l'année suivante (1854) par M. Frischen, de Hanovre, et découvert à nouveau quelques années plus tard par MM. Siemens et Halske ; 2° le système du pont de Wheatstone, dont l'idée émise assez vaguement en 1858 par un Américain, M. Farmer, fut nettement posée en 1863 par M. Maron, de Berlin, mais sans avoir été soumise par lui à aucun essai sérieux.

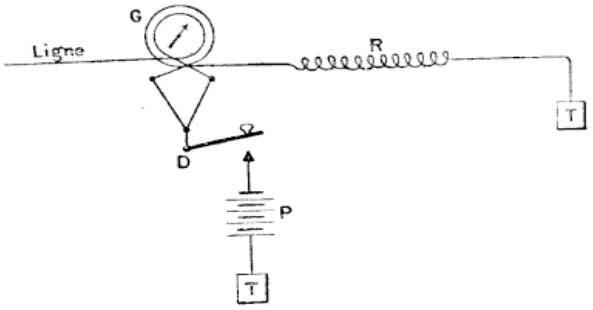


Fig. 445.

Le système différentiel est basé sur l'emploi de récepteurs dont les bobines comprennent deux fils enroulés en sens inverse. Le Dr Gintl reliait l'un d'eux à la ligne, l'autre à un rhéostat convenablement réglé ; un manipulateur à doubles contacts lui permettait d'envoyer simultanément dans les deux circuits les courants de deux piles distinctes dont les effets se détruisaient réciproquement dans le récepteur de la station de départ.

[1] Jüllig. *Die Kabeltelegraphie*, p. 243.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

MM. Frischen et Siemens enroulaient également en sens inverse les deux fils du récepteur, mais leur donnaient exactement la même résistance et les plaçaient, autant que possible, dans des conditions identiques par rapport à l'aiguille aimantée. Ces deux fils étaient reliés d'une part à une même pile P (fig. 445), d'autre part l'un à la ligne, l'autre à une résistance R égale à celle de la ligne. Le courant de la pile P se partage en deux moitiés exactement égales dont les effets s'annulent sur le récepteur G. Le courant venant de la ligne au contraire se rend à la terre, en traversant soit les deux circuits du récepteur successivement dans le même sens et la résistance R, lorsque l'interrupteur D est relevé, soit l'un des circuits seulement et la pile P (en très grande partie au moins), lorsque D est abaissé. Son action sur l'aiguille aimantée est donc sensiblement la même dans les deux cas et le récepteur fonctionne dans les mêmes conditions que le poste P transmette ou non.

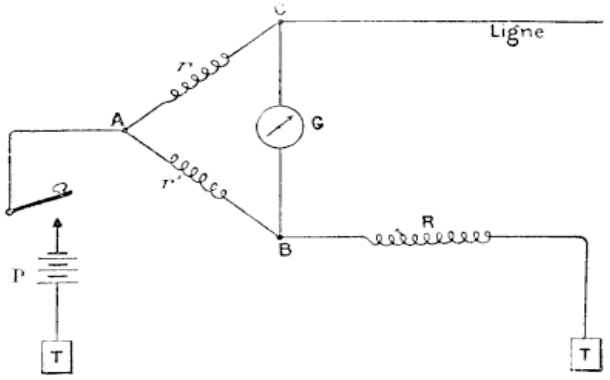


Fig. 446.

Dans le système du pont de Wheastone (fig. 446), la ligne forme la quatrième branche d'un pont dont le sommet éloigné est à la terre. Les résistances R, r et r' étant réglées pour l'équilibre, les sommets B et C sont au même potentiel et le courant de la pile P ne peut traverser la diagonale B C : si donc on place le récepteur G dans cette diagonale, l'appareil n'est pas influencé par le courant de la pile de départ, mais reproduira tous les signaux transmis par le poste éloigné.

Les difficultés que l'on rencontre dans la pratique pour appliquer l'un ou l'autre de ces systèmes proviennent d'un petit mouvement brusque, de courte durée, que reçoit l'aiguille du galvanomètre récepteur à chaque ouverture et fermeture du circuit de la pile P. Ces deux mouvements, de sens inverse l'un de l'autre, sont dus au flux d'électricité provenant alternativement de la charge et de la décharge de la ligne. Ils ont pu être rendus à peu près nuls sur les lignes aériennes, par l'emploi de condensateurs imaginés par M. Stearns ; le flux d'électricité provenant de la charge et de la décharge de la ligne se trouve ainsi exactement balancé par celui de sens contraire provenant de la charge et de la décharge des condensateurs.

Les lignes sous-marines ayant une capacité électrostatique beaucoup plus considérable que les lignes aériennes, prennent des charges bien plus

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

grandes ; comme elles sont en outre desservies par des appareils plus délicats, la balance est plus difficile à établir et à maintenir. Aussi ce ne fut qu'en 1873 que M. de Sauty parvint à duplexer le premier un câble d'une certaine longueur, celui de Gibraltar à Lisbonne (360 milles marins). Il employa le système du pont et établit en dérivation, en divers points de la résistance R (fig. 447), une série de condensateurs, en constituant ainsi, suivant une idée qui avait été émise en 1862 par M. Varley, une ligne artificielle possédant à la fois de la résistance et de la capacité ; le produit de ces deux quantités devait être le même pour la ligne artificielle que pour le câble réel. Une semblable ligne néanmoins, pour constituer un équivalent aussi parfait que possible du câble même, devrait avoir ses subdivisions poussées à l'infini. Cette condition a été réalisée d'une manière fort ingénieuse en 1874 par MM. Muirhead et Taylor : aussi, c'est à partir de cette date seulement que la transmission duplex sous-marine est devenue pratiquement possible et a été appliquée successivement à un grand nombre de câbles sous-marins.

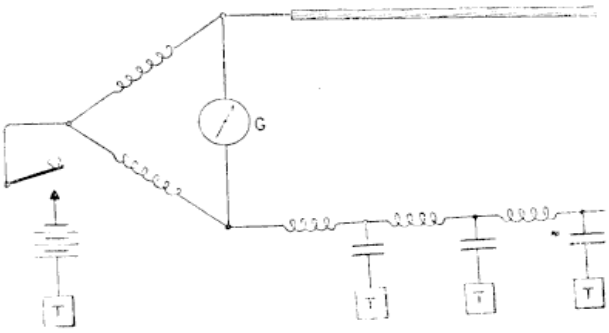


Fig. 447.

MÉTHODE DE MUIRHEAD

La ligne artificielle, à laquelle MM. Muirhead et Taylor donnent de préférence le nom de *résistance inductive*, se compose d'une feuille de papier saturé de paraffine sur laquelle on place une feuille d'étain découpée de façon à présenter une série de bandes longues et étroites reliées les unes aux autres bout à bout (fig. 448). Cette feuille est recouverte d'une autre feuille de papier paraffiné sur laquelle on met une feuille d'étain entière par-dessus laquelle on place une nouvelle feuille de matière isolante, puis une feuille d'étain découpée en rubans, et ainsi de suite. Les feuilles d'étain découpées sont réunies les unes aux autres de telle sorte que les courants électriques puissent les parcourir successivement d'une extrémité à l'autre : elles constituent le conducteur de la ligne artificielle. Les feuilles d'étain non divisées

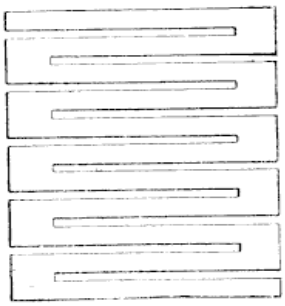


Fig. 448.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont de leur côté réunies toutes ensemble et mises en communication avec la terre : elles représentent l'armature extérieure du câble dont les feuilles de papier paraffiné forment le diélectrique. En découpant les feuilles d'étain en bandes plus ou moins larges, on arrive à ajuster à peu près la résistance de la ligne à sa capacité, par unité de longueur, dans chaque cas particulier.

Les feuilles d'étain découpées sont remplacées quelquefois par des bandes de papier buvard dans la pâte duquel on a incorporé 50 p. 100 de son poids de plombagine finement pulvérisée. Les premières donnent toutefois de meilleurs résultats, par suite des difficultés que l'on éprouve à obtenir de bons contacts avec le papier plombaginé.

MM. A. et J. Muirhead ont également formé des lignes artificielles avec des fils de cuivre enveloppés de soie ou de coton que l'on plonge dans de la paraffine fondue et que l'on recouvre ensuite de bandes de cuivre doré enroulées en hélice. Le fil de cuivre central dont les dimensions sont calculées d'après la résistance que l'on veut obtenir, représente le conducteur de la ligne artificielle ; l'armature extérieure est mise en communication avec la terre. Ce dernier genre de résistances inductives est néanmoins réservé plutôt pour les duplex de lignes aériennes.

En général, le produit de la résistance r par la capacité C de la ligne artificielle doit être égal au produit de la résistance r' par la capacité C′ du câble

$$r\,C = r'\,C'$$

Exceptionnellement, et lorsque les branches de comparaison du pont sont égales, M. Muirhead prend

$$r = r'$$

et par suite

$$C = C'$$

Une ligne artificielle ne pouvant jamais représenter d'une manière absolument exacte un câble sous-marin, dont les diverses sections peuvent avoir des compositions différentes et se trouver immergées à des profondeurs très variables, au milieu de couches d'eau à des températures très diverses, M. Muirhead a jugé nécessaire d'ajouter à ses lignes artificielles certains dispositifs permettant d'équilibrer plus complètement la première partie de ces lignes avec les premiers milles des câbles à duplexer. Ces dispositifs consistent dans l'introduction, d'une part de bobines de résistances entre le récepteur et les lignes réelle et artificielle, et d'autre part de condensateurs supplémentaires destinés à augmenter la capacité, soit du récepteur lui-même, soit des portions des circuits avec lesquelles il est immédiatement en contact.

Lorsque la ligne principale est défectueuse, M. Muirhead introduit dans la ligne artificielle des circuits d'écoulement à travers des résistances réglées

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 449). Quelquefois, ces circuits d'écoulement, au lieu d'être mis directement à la terre, aboutissent à des condensateurs de faible capacité (fig. 450).

La figure 451 représente la disposition théorique la plus générale adoptée par M. Muirhead dans les nombreuses installations duplex qu'il a faites

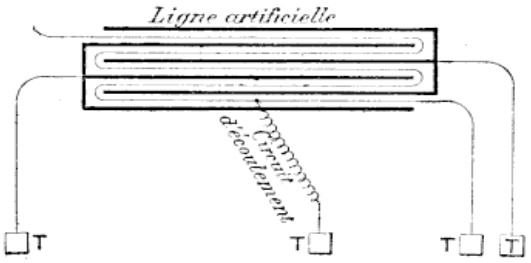


Fig. 449.

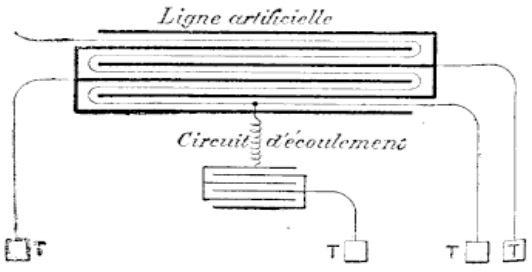


Fig. 450.

tant sur les câbles de l'*Eastern Telegraph C°* que sur le câble *direct* des États-Unis : mais, en réalité, elles sont ordinairement beaucoup plus simples.

Les deux lignes de Marseille à Bône et de Marseille à Malte par Bône ont

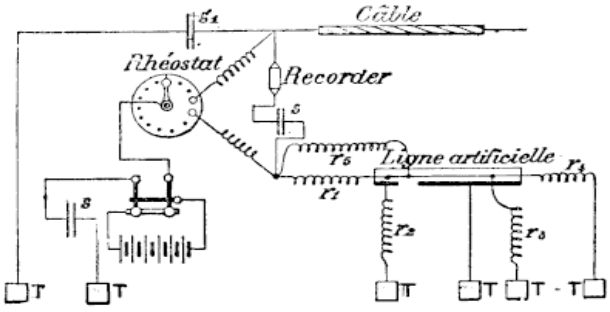


Fig. 451.

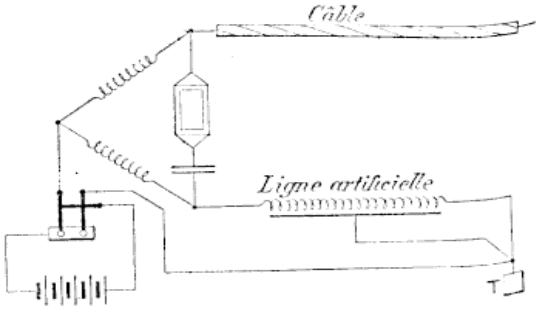


Fig. 452.

été expérimentées les premières de cette manière, celle de Marseille à Bône, en 1875, celle de Marseille à Malte, en 1876. On a pour ces deux câbles :

	Câble de Marseille à Bône	Câble de Marseille à Malte
Longueur du câble en milles marins.	447,66	848
Résistance du cuivre	5210ω	9632ω
Capacité électrostatique. . .	128ϕ,7	238ϕ,24
Isolement par mille marin .	3124Ω	2113Ω

La disposition des appareils et des communications est celle indiquée par la figure 452. M. Muirhead se borne à équilibrer le câble par la ligne artificielle et à placer un condensateur dans la diagonale du pont contenant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'appareil récepteur. L'équilibre est généralement obtenu dans les conditions suivantes :

CABLES	BRANCHES DU PONT		CAPACITÉ du condensateur de réception	LIGNE ARTIFICIELLE	
	supérieure	inférieure		Résistance	Capacité
Marseille-Bône. . . .	1000 ω	1009 ω	40 ϕ	5035 ω	97 ϕ, 4
Marseille-Malte	2000	2025	40	17000 à 18000	190 à 230

Le nombre d'éléments de pile employés est de 8 éléments Leclanché, équivalant à 11,8 éléments Daniell, sur le câble de Bône et de 22 éléments Leclanché, équivalant à 32,6 éléments Daniell, sur le câble de Malte.

La vitesse de transmission qu'obtiennent sur les deux lignes, au *recorder*, des employés habiles, est de 25 mots anglais par minute dans chaque sens.

A Aden, sur la section d'Aden à Bombay, dont la longueur est de 1 817 milles marins, la balance fut obtenue en faisant $s_1 = 1{,}23$ microfarad, $r_1 = o$, $r_2 = o$, $r_3 = 210\,000$ ohms, cette dernière résistance étant appliquée au point 250 milles, distance comptée à partir du bas de la ligne artificielle, $r_4 = \infty$, $r_5 = \infty$. La résistance totale de la ligne artificielle était de 11 827 ohms (soit les 3/4 environ de celle de la ligne réelle), sa capacité de 656 microfarads, les résistances des branches de comparaison du pont étaient de 2 000 et 2 030 ohms respectivement, la première se trouvant près du câble, la deuxième près de la ligne artificielle.

A Bombay, $\rho_1 = 2\,003$ ohms, $\rho_2 = 2\,035$, $r_1 = 60$, $r_2 = 120$, $r_3 = \infty$, $r_4 = 175\,000$, $r_5 = \infty$.

Le câble de Ballingskellig's Bay (Irlande) à Torbay (Nouvelle Écosse) appartenant à la *Direct United States Atlantic cable C°* est le premier câble atlantique auquel le système duplex ait été appliqué. Sa longueur est de 2 423 milles marins, la résistance du conducteur de 7 315 U. S.[1], la capacité de la ligne de 987,6 microfarads.

A Ballingskellig's, la balance est obtenue en faisant $r_1 = 22$, $r_2 = 1\,400$, $r_3 = 10\,000$, $r_4 = 1\,600$ U. S., $r_5 = \infty$; $s_1 = 0{,}06$ ϕ, $s = 60$ microfarads. Les branches de comparaison sont $\rho_1 = 2\,000$ ohms, $\rho_2 = 2\,036$ ohms, la résistance la plus forte se trouvant du côté de la ligne artificielle.

A Torbay, l'équilibre correspond à $r_1 = 0$, $r_2 = 50$, $r_3 = 5\,000$ à une distance représentant 1 600 milles marins de la ligne réelle, $r_4 = \infty$, $r_5 = 90\,000$ U. S., $s_1 = 4{,}37$ ϕ et $s = 60$ microfarads. $\rho_1 = 2\,000$ ohms, $\rho_2 = 2\,010$ ohms[2].

Le rapport des capacités de chaque ligne artificielle, à Ballingskellig's et

[1] Une unité Siemens vaut 0,9434 ohm légal.

[2] A. Muirhead, *The telegraphic Journal and electrical review*, année 1879.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Torbay, à celle du câble est 4/5. La vitesse de transmission obtenue sur cette ligne est de 100 lettres par minute dans chaque sens, soit à peu près le double de ce qu'elle donne en simple. Le récepteur est un galvanomètre à miroir. Le réglage du duplex est plus difficile avec cet instrument qu'avec le *recorder* pour deux motifs : d'une part, le miroir étant plus sensible que le *recorder* et l'index lumineux parcourant toujours dans le premier l'échelle en ligne droite, le déplacement du zéro peut être facilement confondu avec des signaux ; dans le *recorder* au contraire, ce déplacement se faisant dans une direction transversale à l'axe de la bande de papier, modifie un peu la position relative des signaux sur la bande, sans en altérer sensiblement la forme ; les signaux du miroir étant fugitifs doivent être perçus d'autre part plus nettement que ceux du *recorder*, que l'on peut déchiffrer à loisir.

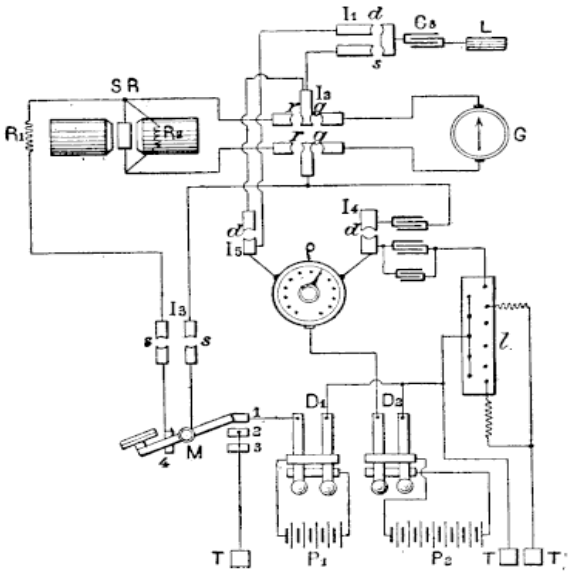


FIG. 453.

L'installation effective d'une grande partie des stations de l'*Eastern Telegraph C°* est indiquée par la figure 453 [1], dans laquelle *l* représente la ligne artificielle Muirhead, SR le *siphon-recorder*, ρ une caisse de résistances à curseur. De simples manœuvres de commutateurs permettent de passer de la communication ordinaire, en simple, au duplex, et du *recorder* au miroir inversement. Pour recevoir au *recorder*, on bouche par des chevilles les trous marqués *r* dans le commutateur I_2 et on débouche ceux marqués *g* ; on bouche, au contraire, *g* et on débouche *r* pour recevoir au galvanomètre à miroir.

Lorsque l'on travaille en simple, les trous marqués *s* dans les commutateurs I_1, I_3, I_4, I_5, sont bouchés et ceux marqués *d* sont ouverts. On transmet avec la clef D_1, le levier de la clef d'inversion M appuyant sur les contacts 1 et 4. Si l'on abaisse la touche de gauche, par exemple, de D_1, le courant positif se rend directement à la terre ; le courant négatif arrive au contact 1 et se divise dans le levier M en deux parties : l'une traverse I_3, I_2, l'appareil

[1] Dr A. Tobler. *Die Einrichtung der Küstenstationen langer Unterseekabel. Elektrotechnische Zeitschrift*, 1884.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

S R et son shunt R_2, I_2, I_1, et arrive au condensateur C_3 ; l'autre traverse I_3, R_1, et se réunit de nouveau à la première partie.

Pour travailler en duplex, on débouche les trous *s* et on bouche ceux marqués *d* dans I_1, I_3, I_4 et I_5 et on manipule avec la clef D_2 qui est en relation avec une pile P_2 un peu plus forte que P_1 ; le commutateur M ne sert plus à ce moment.

MÉTHODE D'ANDERSON ET HARWOOD

La pile P (fig. 454) se trouve dans la diagonale qui contient ordinairement l'appareil récepteur G et réciproquement ; des condensateurs d'une capacité à peu près égale à celle que l'on emploie sur la ligne pour la transmission en simple sont placés dans les branches de comparaison ; une partie en est subdivisée en unités très faibles pour la commodité du réglage de l'équilibre. Une ligne artificielle Muirhead *l* forme la troisième branche du pont, le câble la quatrième branche.

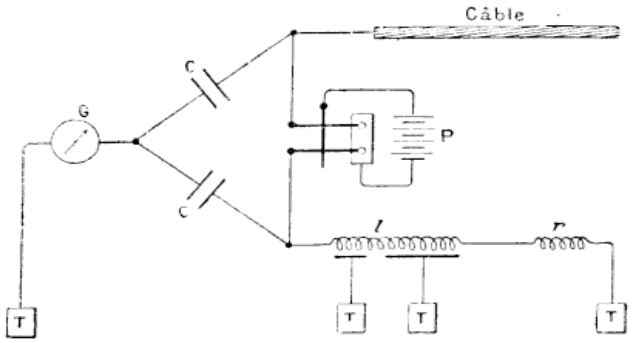


Fig. 454.

Ce système donne de bons résultats sur des lignes de longueurs moyennes. Il est employé notamment sur le câble de Portheurnow à Lisbonne, dont la longueur est de 850 milles marins, la résistance du cuivre de 8 050 ohms et la capacité de 250 microfarads environ. La ligne artificielle servant à duplexer ce câble est enfermée, à Portheurnow, dans neuf caisses ; sa résistance est de 5 819 ω, sa capacité de 192 φ. La résistance qui lui fait suite est de 3 000 ω ; les condensateurs placés dans les branches de comparaison ont 40 φ de capacité environ chacun. La pile servant aux transmissions est composée de 10 éléments Minotto, la vitesse de transmission dans chaque sens est de 140 lettres par minute [1].

MÉTHODE DE STEARNS

M. Stearns a employé le système différentiel pour duplexer les câbles de l'*Anglo american telegraph C°*. Les deux circuits de la bobine du recorder

[1] Dr Tobler, *loc. cit.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ont une résistance de 250 ohms environ chacun. Une ligne artificielle (fig. 455) fait équilibre au câble : cette ligne est composée d'un ruban de métal d'une résistance spécifique très considérable, enroulé autour d'une grosse corde et recouvert ensuite d'une couche aussi mince que possible d'une substance isolante possédant une grande capacité inductive. On règle la balance en faisant varier les résistances r et r' ; en cas de besoin, on introduit une résistance entre le condensateur C et le câble. On peut diminuer l'intensité du courant d'arrivée dans le récepteur, en réunissant par un shunt les bornes 1 et 2.

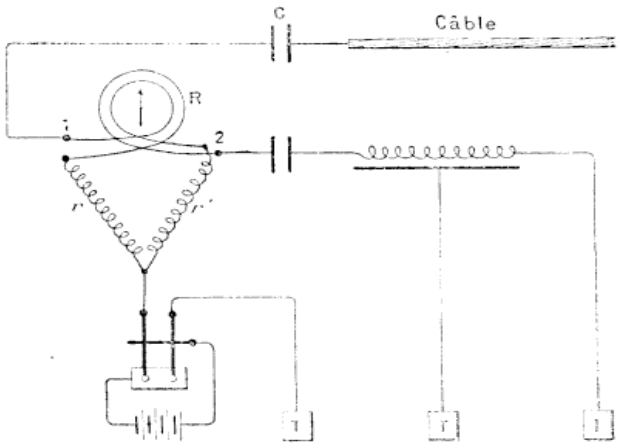


FIG. 455.

MÉTHODE D'AILHAUD

Le duplex Ailhaud peut être considéré comme une combinaison du système différentiel et de celui du pont de Wheatstone. A l'inverse de toutes les méthodes précédentes, on ne fait aucun usage d'une ligne artificielle, c'est-à-dire d'une ligne présentant, aux mêmes points, à la fois de la résistance et de la capacité : la quatrième branche du pont est formée d'un simple rhéostat B (fig. 456). Pour annuler dans le récepteur G (miroir ou *recorder*) l'effet des courants de charge et de décharge du câble, on enroule sur la bobine de l'appareil, mais en sens inverse, un second fil S dont l'une des extrémités est mise à la terre et dont l'autre aboutit au sommet Y du pont, par l'intermédiaire d'un condensateur A réglé par une résistance z. La charge et la décharge de ce condensateur agissant sur le récepteur en même temps que celles du câble et dans une direction opposée, en neutralisent sensiblement l'effet, si la résistance z est convenablement choisie. Le condensateur A, par sa position près du sommet inférieur du pont, fait en outre équilibre à une partie de la capacité du câble et, en réalité, double à peu près l'amplitude des signaux d'arrivée.

L'intensité et la durée des courants de charge et de décharge du câble

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une part et du condensateur A d'autre part n'étant toutefois pas exactement égales, l'aiguille du récepteur G exécute à chaque fermeture et à chaque ouverture du circuit de la pile une série de vibrations de peu d'étendue, mais qui seraient suffisantes pour rendre le travail impossible. On les détruit en attachant : 1° entre les sommets O et X un condensateur C réglé par un rhéostat γ ; 2° entre le sommet Y et la terre, un autre condensateur D également réglé par un rhéostat δ. Le condensateur C a pour effet de diminuer, pendant le temps nécessaire à la charge du condensateur A, la résistance de la branche O X et, par suite, d'augmenter le potentiel en X, d'où résulte un courant momentané circulant de X vers Y. Le condensateur D n'a généralement qu'une très faible capacité, mais est indispensable néanmoins pour obtenir un équilibre parfait.

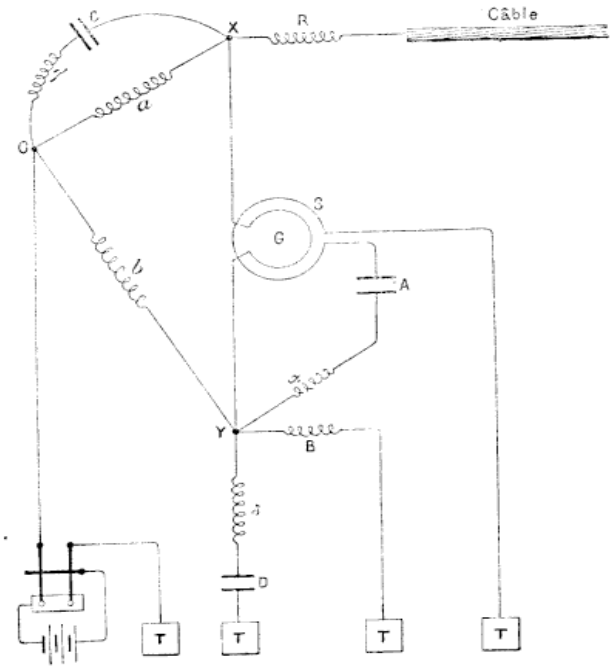


Fig. 456.

Une résistance R est généralement intercalée entre le sommet X et le câble, dans le but de rendre simultanés et de durées sensiblement égales, les courants de charge et de décharge des quatre groupes de capacités (A, C, D et le câble) dont la nature, la grandeur et la position sont différentes. Elle facilite le réglage, mais n'est néanmoins pas indispensable.

Réglage.

On établit d'abord l'équilibre de l'état permanent, pour les deux courants, entre les résistances a, b, B, R et le câble y compris les appareils de la station éloignée. Lorsque les émissions de courant sont très courtes, ce qui se présente dans le travail au miroir ou au *recorder*, il est préférable de ne pas avoir un équilibre trop parfait ; on peut sans inconvénient donner à B une valeur supérieure d'un quart ou inférieure d'un cinquième à sa valeur normale. La capacité totale des condensateurs en service, pour obtenir l'équilibre, varie dans le même sens que B. Les résistances a et b des deux

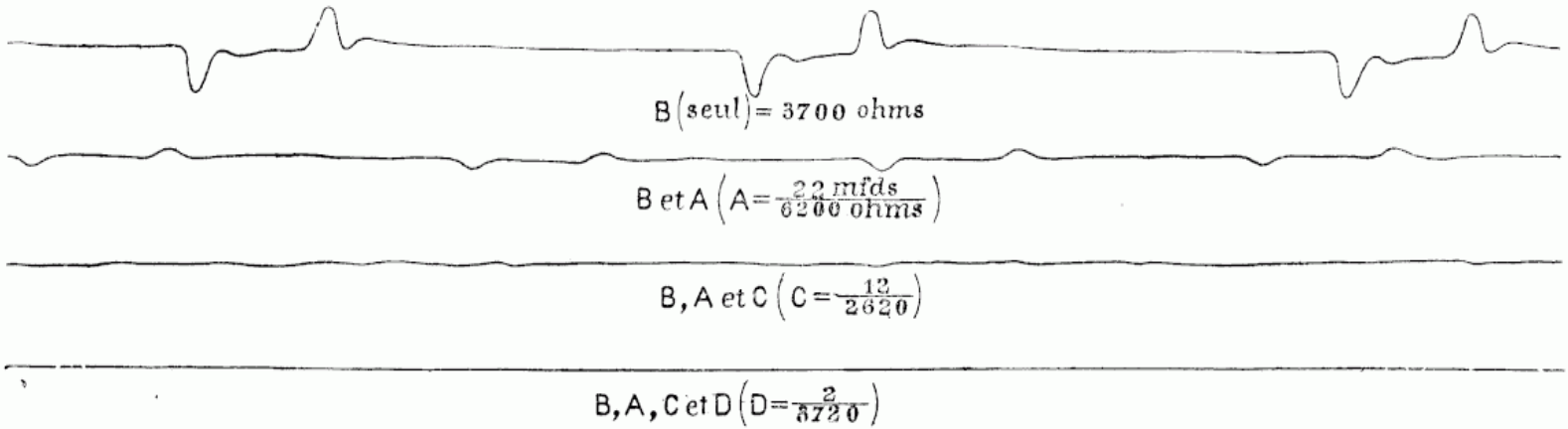
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Spécimens de réglages Duplex

Expériences faites avec trois éléments Callaud (grand modèle) sans condensateurs de transmission.

CABLE 1879



CABLE 1880

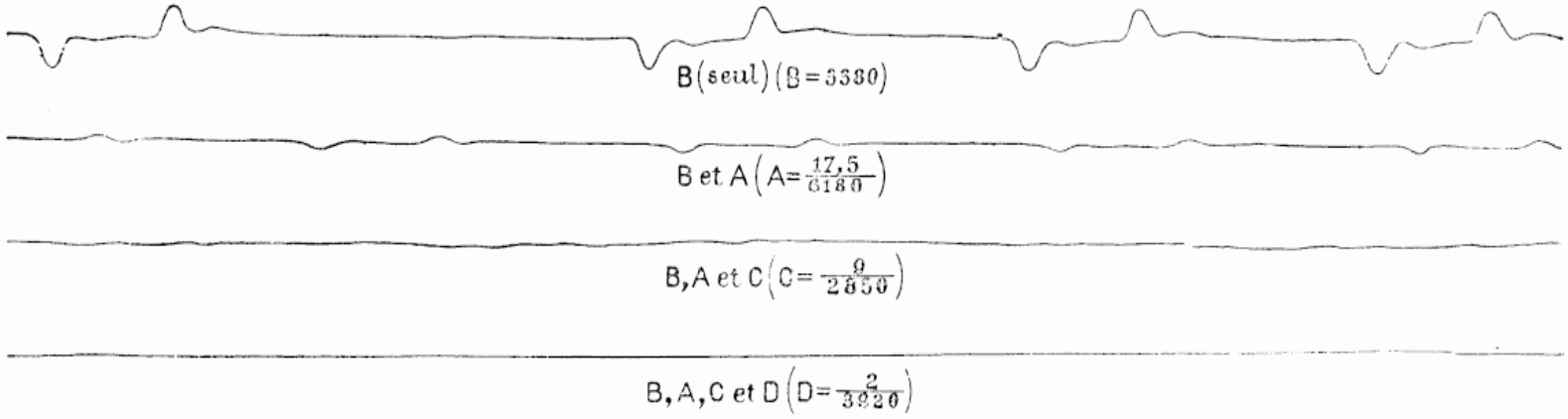


Fig. 457 et 458.

branches de comparaison du pont peuvent varier dans le rapport de 1 à 2.

On règle ensuite l'équilibre des courants de charge et de décharge, en faisant varier la résistance α qui accompagne le condensateur A jusqu'à ce que l'on ait réduit au minimum possible les secousses brusques de l'aiguille du galvanomètre ou de la bobine du *recorder*, à chaque ouverture ou fermeture du circuit de la pile. Afin de conserver une concordance suffisante entre les effets de charge et de décharge du câble et ceux du condensateur A, il convient de donner à α une valeur en rapport avec la résistance du câble, sans lui être nécessairement tout à fait égale ; on obtient ainsi une limite au-dessous de laquelle on ne doit pas faire descendre A. A chaque réglage on choisit pour A une valeur arbitraire un peu supérieure à cette limite et on détermine facilement la valeur correspondante de α.

On achève de détruire les vibrations qui subsistent encore, en ajustant successivement les résistances qui règlent les condensateurs C et D. La résistance γ, comme la résistance α, ne doit pas tomber au-dessous d'une certaine valeur au delà de laquelle on ne pourrait plus arriver à l'équilibre, sans toucher de nouveau aux éléments du système déjà déterminés : on obtient en général une valeur convenable pour γ en prenant C un peu supérieur à la moitié de A. La capacité de D, qui achève de perfectionner l'équilibre déjà bien près d'être établi par l'emploi des autres éléments du système, est ordinairement comprise entre $\frac{1}{2}$ et $2\frac{1}{2}$ microfarads ; la résistance δ a moins d'influence que les autres résistances régulatrices de condensateurs et peut varier dans d'assez grandes limites.

Les figures 457 et 458, qui sont des fac-similés exacts des courbes obtenues sur les câbles Marseille-Alger de 1879 et de 1880, montrent très clairement l'influence relative des divers éléments du système, dans le réglage.

Nous donnons ci-après, pour montrer l'élasticité de la méthode Ailhaud, les valeurs des résistances des rhéostats et des capacités des condensateurs qui ont donné l'équilibre dans trois séries de réglages en duplex du câble Marseille-Alger de 1879 : la longueur de ce câble est, comme l'on sait, de 494 milles marins, la résistance de son conducteur de 5 390 ohms et la capacité électrostatique de son âme de 142 microfarads.

Dans la première série d'expériences, on a fait varier les résistances a et b des branches de comparaison du pont ;

Dans la deuxième série, on a fait varier la résistance B de la quatrième branche du pont ;

Enfin dans la troisième série, on a fait varier la résistance R placée devant le câble.

Dans ce tableau les résistances sont exprimées en ohms ω, et les capacités électrostatiques en microfarads φ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

	BRANCHES DU PONT		R	B	GROUPE A		GROUPE C		GROUPE D		CAPACITÉ totale des condensateurs
	a	*b*			α	A	γ	C	δ	D	
	ω	ω	ω	ω	ω	c	ω	c	ω	c	c
1re série	2000	1000	830	3110	6830	18	2860	9	1000	2	29
	2000	1500	830	4980	8430	16	3520	9	1390	2	27
	2000	2000	830	5700	10020	11 1/2	2610	8	1200	1/2	20
2e série	2000	1000	830	3050	6680	17 1/2	2870	9	3720	2	28 1/2
	2000	1000	830	3500	6500	20	2860	10	3800	2	32
	2000	1000	830	4000	6530	24	2270	12	3600	2	38
	2000	1000	830	4500	6250	26 1/2	2330	13 1/2	2200	2	42
	2000	1000	830	5000	6150	27	2120	14	2800	2	43
3e série	2000	1000	830	3030	6950	18	2700	9	5920	2	29
	2000	1000	500	3000	5200	20	1930	10	2210	2	32
	2000	1000	200	3300	3900	24	1120	12	1920	2	38
	2000	1000	0	3500	3320	27	630	15	710	2	44

Expérimenté dans les mêmes conditions, le câble de Marseille à Malte (longueur 848 milles marins) a pu être duplexé avec 39,5 microfarads de capacité totale, en prenant le rapport des branches du pont $\frac{a}{b} = 2$

Autrefois, avec les récepteurs à miroir et sans condensateur de transmission, le duplex Ailhaud nécessitait sur les câbles d'Alger 7 à 10 éléments Callaud, le pont étant de $\frac{2\,000}{1\,000}$. Actuellement, avec les mêmes valeurs pour les résistances du pont, en employant comme récepteur le *siphon-recorder* sans moulinet électrique qui est moins sensible, en raison du frottement direct du siphon sur la bande de papier, et interposant en avant du pont un condensateur de transmission de 35 microfarads, le système exige 20 éléments Callaud. Il a été reconnu expérimentalement que la portion du courant de départ qui est réellement envoyée sur la ligne équivalait à celui de 2,45 éléments Callaud appliqués directement au câble. La mesure se fait simplement en comparant les impulsions produites à un galvanomètre à miroir placé en avant du câble :

1° lorsque l'on envoie par le transmetteur automatique le courant dans le câble avec l'arrangement ordinaire du duplex Ailhaud (condensateur de transmission de 40 ♀, 88, pile de 20 éléments Callaud, grand modèle, branches du pont $\frac{2\,000}{1\,000}$ etc). La déviation obtenue sur le câble de 1880 est de 38 divisions ;

2° lorsque l'on envoie à l'automatique le courant de 3 éléments Callaud directement dans le câble, sans condensateur de transmission ni aucune des dispositions du duplex Ailhaud. La déviation est de 46,5 divisions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Transmetteur automatique, système Belz et Brahic.

La vitesse de transmission, dans les conditions que nous venons d'indiquer, est de 600 à 650 émissions de courant par minute, *dans chaque sens*. Une pareille vitesse de manipulation ne pouvant être soutenue longtemps par les employés même les plus habiles, on a dû faire usage d'un transmetteur automatique. MM Belz et Brahic ont adapté à ce service, d'une manière fort ingénieuse, le transmetteur des appareils Wheatstone à bande perforée auquel ils ont joint un relais Froment monté en inverseur de courant.

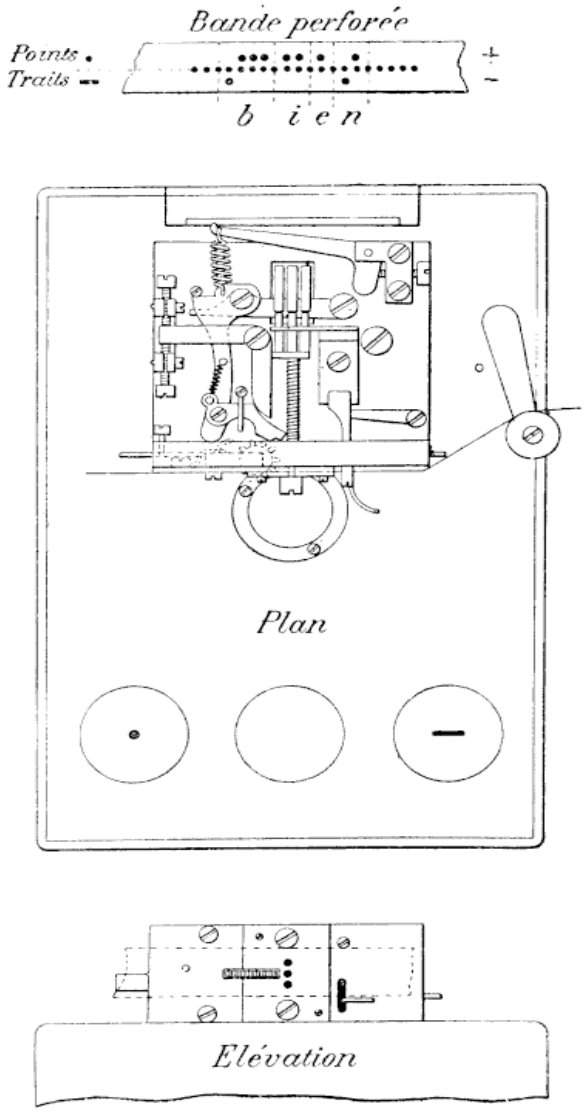


Fig. 459.

Le balancier B du transmetteur modifié (fig. 460) est en métal au lieu d'être en ébonite et n'agit plus que par une seule cheville. L'inverseur, les leviers et les tiges qui y aboutissaient sont supprimés et remplacés par deux leviers coudés $p\ o\ m$, $p'\ o'\ m'$, montés sur le même axe, en relation d'un côté avec les aiguilles, de l'autre avec deux vis butoirs isolées l'une de l'autre. Deux ressorts à boudins $q\ r$, $q'\ r'$, tendent à appliquer constamment les leviers coudés contre les vis butoirs : ces ressorts, au lieu d'être fixés d'une manière invariable à leurs extrémités r et r', sont reliés à des leviers $u\ v$, $u'\ v'$; des vis t permettent de régler à volonté la tension des ressorts. L'ensemble de tout le mécanisme est très solide et peut fonctionner pendant des mois, sans qu'il soit nécessaire d'y toucher.

L'appareil n'ayant à transmettre que des points, le perforateur (fig. 459) a été simplifié. Il n'y reste plus que trois poinçons, l'un pour les émissions

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

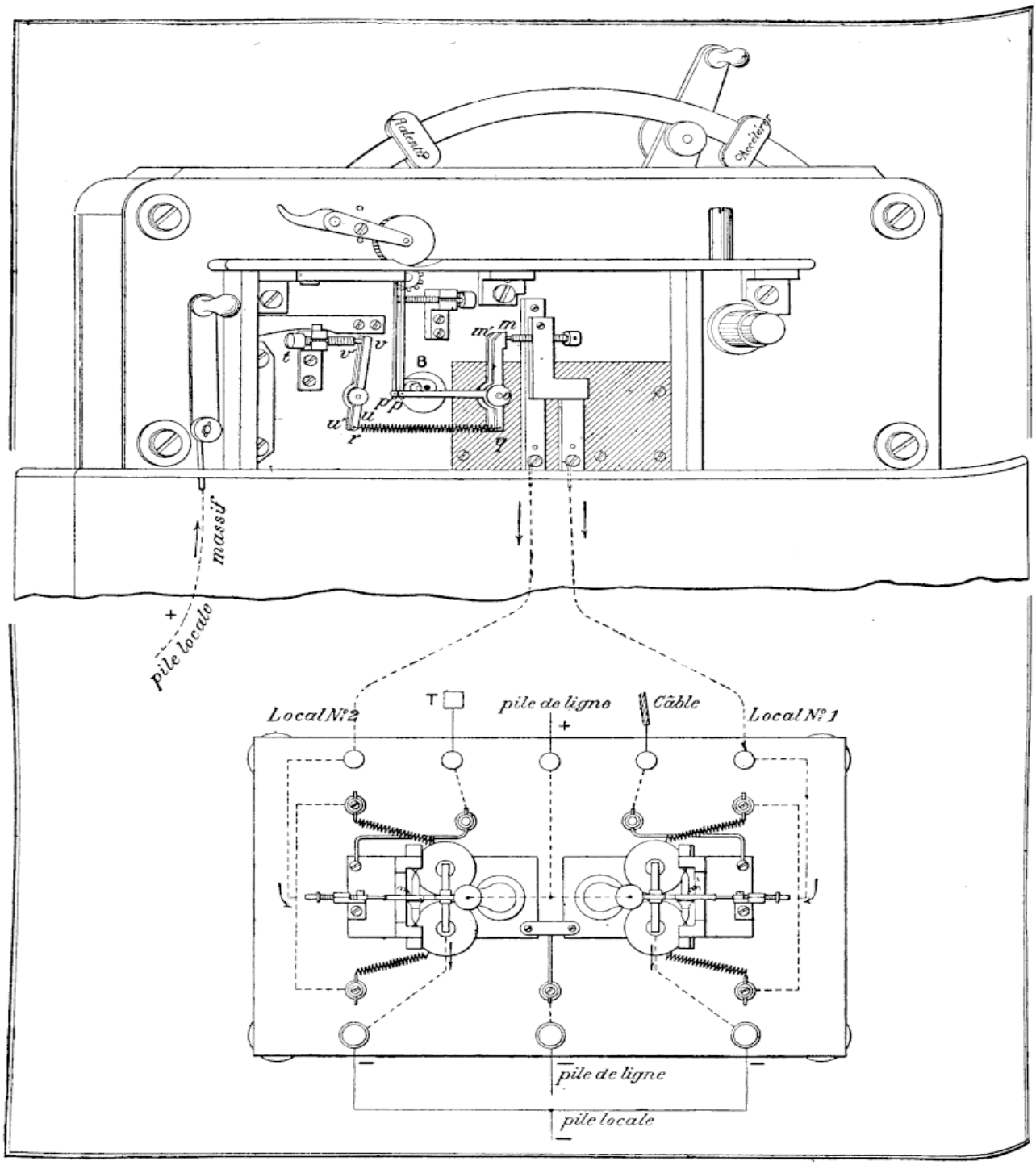
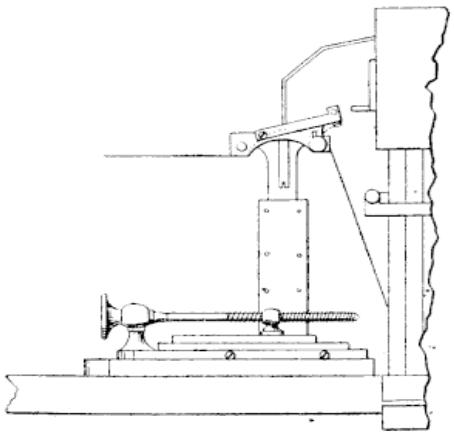


Fig. 460 et 461.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

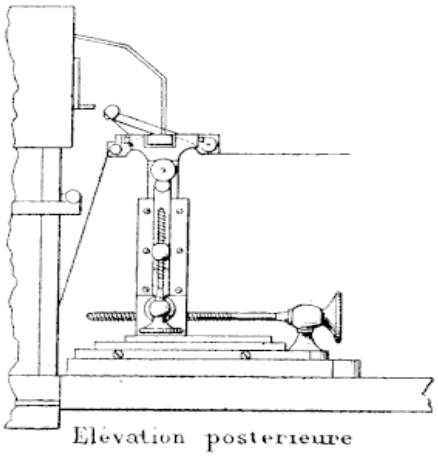
de courants positifs correspondant aux points, l'autre pour celles des courants négatifs correspondant aux traits de l'alphabet Morse, le troisième enfin pour l'entraînement de la bande de papier.

La figure 461 donne le plan des communications du relais Froment monté



Élévation antérieure

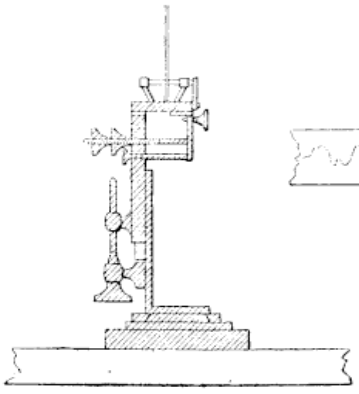
Fig. 462.



Élévation postérieure

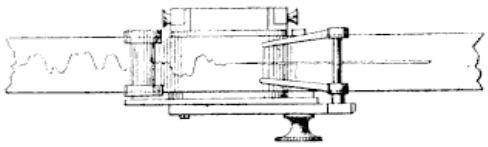
Fig. 463.

en inverseur de courant. Une pile locale positive est reliée au massif du transmetteur automatique; son courant est envoyé, par le jeu de cet



Coupe

Fig. 464.



Plan

Fig. 465.

appareil, tantôt dans l'une, tantôt dans l'autre paire de bobines du relais: les deux bobines de chaque paire sont montées en circuits parallèles pour diminuer la résistance de chaque circuit. Les deux pôles de la pile de ligne communiquent, d'un autre côté, l'un avec les deux butoirs supérieurs, l'autre avec les deux butoirs inférieurs entre lesquels se meuvent les palettes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mobiles du relais; le massif de l'une de ces palettes enfin est relié au câble, l'autre à la terre. Suivant que l'une ou l'autre palette est attirée par le courant de la pile locale, le pôle positif ou le pôle négatif de la pile de ligne est mis à la terre et un courant négatif ou positif envoyé dans le câble.

Fig. 466.

Le *recorder* de sir W. Thomson, tel qu'il sort ordinairement des ateliers de construction de M. White, de Glasgow, a, de son côté, subi à la station de Marseille quelques modifications, d'ordre secondaire, il est vrai, mais qui en ont néanmoins simplifié le jeu et régularisé la marche.

Le système dérouleur a été entièrement supprimé et remplacé par le mouvement d'horlogerie d'un Morse ordinaire qu'on a installé sur une table spéciale.

La plaque bombée sur laquelle s'appuie la pointe traçante du siphon et que l'on désigne souvent aussi sous le nom de *selle* a été rendue mobile dans trois directions rectangulaires, de façon à pouvoir être ajustée facilement dans la position nécessaire (fig. 462 à 465).

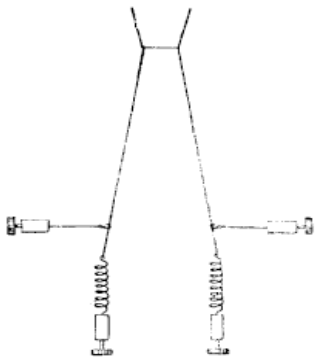


Fig. 467.

Le siphon est porté directement par la bobine S du recorder.

Les deux fils placés sous cette bobine au lieu d'être engagés à la main dans deux des encoches que porte à sa surface un cylindre horizontal (fig. 466), sont sollicités dans une direction perpendiculaire à leur longueur par des crochets attachés à des fibres horizontales que commandent deux vis à très petits pas (fig. 467) : l'écartement des fils peut ainsi être réglé d'une manière continue. Les poids suspendus à ces fils sont enfin remplacés par deux ressorts à boudin qu'on peut tendre, au degré voulu, à l'aide de vis.

Les détails du montage de l'un des postes extrêmes de la ligne sont donnés par la figure 468, dans laquelle on aperçoit, en allant de droite à gauche :

La résistance R placée devant le câble,
Le *recorder* à 2 circuits,
Le dérouleur de papier,
Les branches de comparaison du pont,
Le condensateur de transmission E,
Le condensateur A, avec la caisse de résistances α qui le règle,
La caisse de résistances B formant la troisième branche du pont,
Le condensateur C et la caisse de résistances γ,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

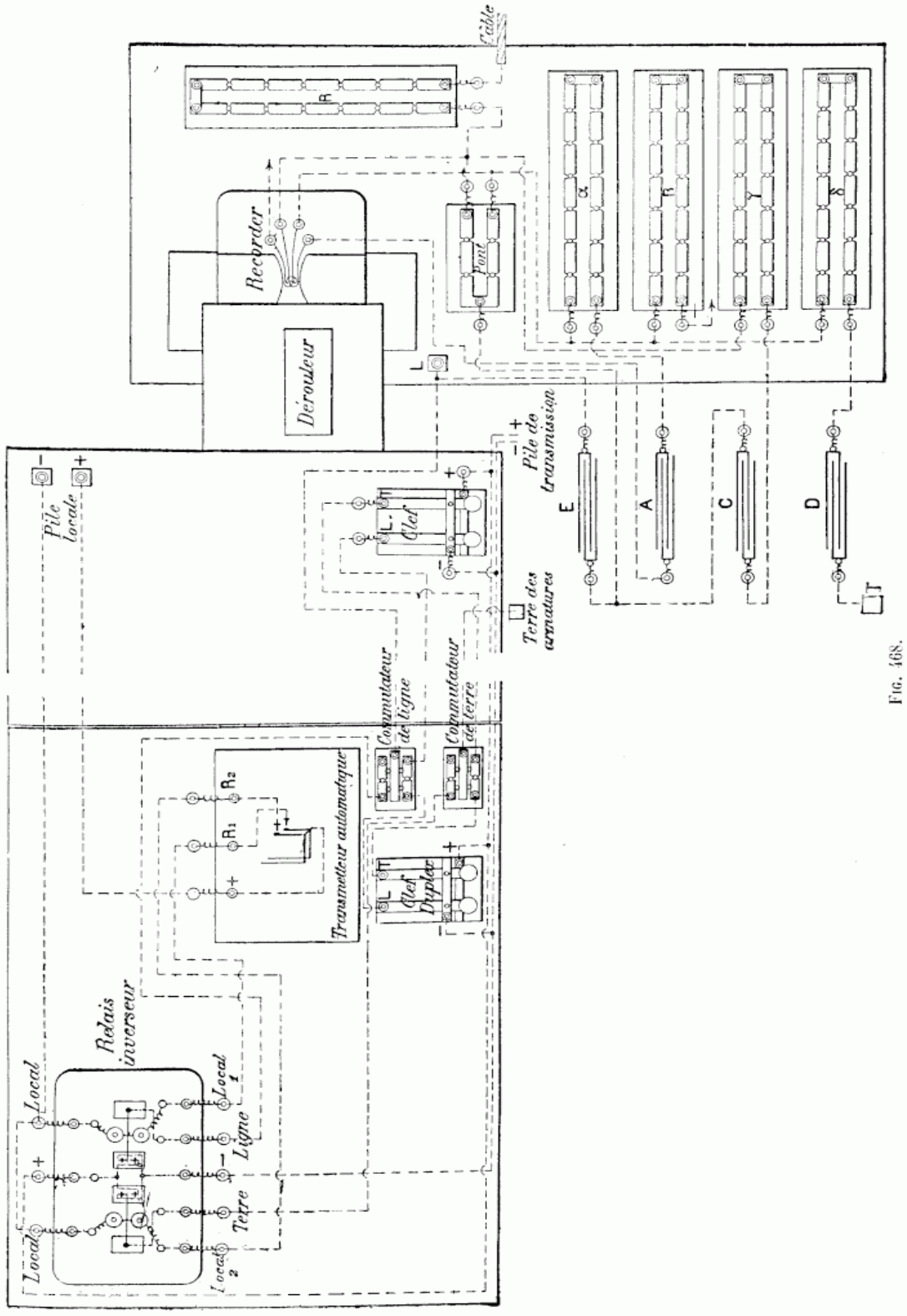


FIG. 168.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le condensateur D et la caisse de résistance δ,

Une première clef double servant à manipuler à la main lorsqu'on ne fait pas usage du transmetteur automatique,

Deux commutateurs bavarois à 4 fils servant à passer les fils d'une clef à l'autre,

Une seconde clef double, dite clef duplex, qui sert au *dirigeur* à manipuler à la main, en cas de besoin,

Le transmetteur automatique,

Enfin le relais inverseur.

On marche régulièrement à raison de 30 tours, par minute, de la roue d'entraînement du papier. Cette roue ayant 20 dents, un tour représente 20 émissions de courant ou intervalles ; or 20 émissions donnent exactement un mot français moyen de 5 lettres, en y comprenant les intervalles des lettres et des mots. La vitesse de transmission sur les câbles d'Alger, dans ces conditions, est donc de 30 mots en moyenne par minute, ou 1 800 à l'heure en simple et 3 600 en duplex pour chaque câble.

Le service est fait à chaque poste et sur chaque câble par 4 ou 5 employés perforateurs ou traducteurs et un dirigeur qui met les bandes perforées en transmission et découpe la bande d'arrivée en séries qu'il remet aux traducteurs.

TRANSMISSION QUADRUPLEX

On donne le nom de *quadruplex* aux arrangements qui permettent de transmettre au même instant mathématique, par le fil conducteur, deux signaux dans un sens et deux autres signaux dans le sens opposé.

Les *diplex* ou systèmes de transmission simultanée de deux signaux dans le même sens sont ordinairement basés sur l'emploi de relais dont l'un ne fonctionne que sous l'influence de courants d'une intensité déterminée, quel qu'en soit le sens, et l'autre que sous l'influence de courants de sens et d'intensité déterminés. On conçoit dès lors que si ces relais actionnent des parleurs ou récepteurs quelconques, deux séries de signaux parfaitement distincts puissent être envoyées simultanément dans les deux appareils. Cette disposition combinée avec un arrangement duplex ordinaire permettra donc de transmettre à la fois quatre dépêches par le même fil conducteur.

M. le Dr A. Muirhead, conjointement avec MM. Briggs et G. Winter, vient d'appliquer aux câbles sous-marins un système de ce genre qui paraît même être sorti déjà de la période des essais et entré dans la pratique courante[1].

[1] J. Munro. *Lumière électrique*, vol. XXVIII, p. 41.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le duplex employé à cet effet est une modification du duplex Muirhead ordinaire, la pile étant placée maintenant entre le câble et la ligne artificielle et les appareils récepteurs entre le milieu de la pile et la terre. Les communications du câble et de la ligne artificielle avec la pile sont interverties après la formation de chaque signal élémentaire : si le pôle positif, par exemple, est relié au câble et le pôle négatif à la ligne artificielle, lors-

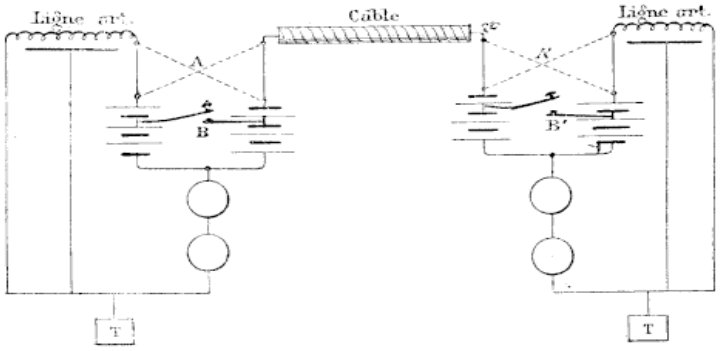


Fig. 469.

que la clef de transmission est abaissée, dès que celle-ci aura été relevée, le pôle négatif sera en relation avec le câble et le pôle positif avec la ligne artificielle. C'est même de là que la méthode a tiré son nom de méthode de *double substitution*. Dans la figure 469, les communications des piles avec les lignes sont indiquées, à l'état de repos, en traits pleins et, dans la position de travail des clefs, en traits pointillés.

Le diplex exige, dans chaque station, deux clefs, une clef double de transmission ordinaire et une clef de court circuit que l'on place entre les deux moitiés de chaque pile. Le sens et l'intensité relative des courants envoyés dans le câble, pour toutes les positions possibles des deux clefs, sont

	Intensité du courant.
Les deux clefs A et B en repos	+ 3
La clef B abaissée, A au repos	+ 1
Les deux clefs abaissées	— 1
La clef A abaissée, B au repos	— 3

A la station de réception, un relais polarisé est réglé de manière à fermer un circuit local lorsque le courant de ligne est négatif et à l'ouvrir ou à le laisser ouvert si ce courant est positif. Les mouvements de la clef A seront donc exactement reproduits par un parleur ou tout autre récepteur avec lequel le relais sera en communication.

Le second relais, chargé de reproduire les mouvements de la clef B et intercalé, comme le premier, entre le milieu de la pile et la terre, comprend deux languettes qui sont mobiles indépendamment l'une de l'autre chacune

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entre deux butoirs : les deux butoirs de repos sont placés dans le circuit local ainsi que les deux languettes lesquelles sont reliées électriquement ensemble. Ces dernières sont en outre polarisées en sens contraire par les deux pôles d'un aimant permanent en fer à cheval et réglées de telle sorte que le contact de l'une d'elles avec son butoir de repos ne soit rompu que par un courant de sens et d'intensité + 3, et celui de l'autre languette avec son butoir de repos par un courant de sens et d'intensité — 3 ; pour des courants intermédiaires + 1 et — 1, les deux languettes restent appuyées sur leurs butoirs de repos. Dans ces conditions, le récepteur actionné par le second relais ne fonctionne que sous l'influence des courants ± 1, c'est-à-dire en même temps que la clef B.

On pourrait craindre qu'un courant + 3 succédant brusquement à un courant — 3, circonstance qui se présente toutes les fois que l'on abaisse la clef A seule après un intervalle de repos, l'une des palettes du second relais ne se remît en contact avec son butoir de repos avant que l'autre palette n'eût quitté le sien, d'où résulterait chaque fois un faux signal. Mais l'expérience a prouvé qu'avec un recorder comme récepteur, on ne pouvait apercevoir aucune trace d'un effet de cette nature.

L'équilibre est parfait lorsque le câble et la ligne artificielle sont exactement équivalents et reste encore satisfaisant lorsque l'on s'écarte, même assez notablement, de cette équivalence complète. On le rend indépendant des variations qui peuvent survenir dans la résistance et la force électromotrice des deux moitiés de la pile, et qui ont pour effet de faire passer un courant dans les appareils récepteurs, en dérivant un ou plusieurs des éléments du milieu de la pile à l'aide d'une résistance à curseur notablement supérieure à la résistance de ces éléments. L'appareil récepteur est placé entre le curseur de la caisse de résistances et la terre.

CONCLUSION

D'autres systèmes plus perfectionnés encore sont à l'étude et pourront sans doute être réalisés pratiquement dans un avenir prochain. Nous nous bornerons à mentionner parmi ces systèmes les installations *sextuplex* et même *octuplex* qui permettraient de transmettre simultanément par un même fil trois ou quatre dépêches dans un sens et autant dans le sens opposé.

La téléphonie à grande distance à travers les câbles sous-marins et la téléphonie combinée avec la télégraphie sollicitent également les recherches des inventeurs, la nécessité de la transmission de la parole à travers les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mers devant arriver à s'imposer avec la même énergie que l'a fait celle de la transmission de la pensée, il y a une quarantaine d'années. Nous ne doutons pas, quant à nous, du succès final des efforts qui sont déjà tentés dans cette voie et cette nouvelle merveille ne sera probablement pas la dernière de celles que la science électrique réserve aux générations du XX^e^ siècle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

INDEX ALPHABÉTIQUE

A

Alger à Port-Vendres (câble d') 28
Alphabets 475
Appareils de transmission. Installation des postes. 487
Appareil Hughes avec décharge 494
Armatures en fer 114
— (Machines pour recouvrir d') 123
— — les câbles d'atterrissement. 135
— — — de grands fonds 124
— — — intermédiaires 131
Atlantique (1er câble) 15
Atlantiques (Câbles) de 1865 et 1866 37
Atterrissement (Pose des câbles d'). 260
Avaries des câbles immergés (Causes des). 282

B

Bathomètre. 245
Bobines auxiliaires de décharge 489
Boucle (Essais par la). Méthode de Murray 426
— — Varley. 427
— Correction de Taylor. 428
Bouées. 221
— (Immersion des) 228
— (Relèvement des). 230

C

Câbles à plusieurs conducteurs. 146
— Baudoin et Allan. 151
— Berthoud, Borel et Cie 109
— Blondot et Bourdin 154

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Câbles Brooks . . . 110
— Duncan . . . 153
— flottants . . . 153
— Fortin-Herrmann . . . 107
— Hooper . . . 102
— légers . . . 151
— Rowett . . . 153
— Siemens . . . 152
— Trott et Hamilton . . . 155
Cagliari à Malte (Câble de) . . . 15
Caisses de résistances . . . 331
— à curseur . . . 334
Caoutchouc . . . 96
— de M. Bruce Warren . . . 109
— Hooper . . . 102
— (Vulcanisation du) . . . 99
Capacité électro-statique de la gutta-percha . . . 77
— du caoutchouc . . . 103
— d'un câble (Mesure de la) . . . 385
— spécifique du diélectrique d'un câble (Mesure de la) . . . 390
Carte des communications télégraphiques sous-marines du globe . . . 54
— des lieux de production de la gutta-percha . . . 73
Cartes des atterrissements des câbles atlantiques du Nord . . . 51 et 52
Chaines en fer . . . 212
Champignons . . . 212
Chanvre . . . 111
Chanvre (Machines à recouvrir de) . . . 113
Chatterton (Composition) . . . 79
Cire fossile . . . 107
— noire . . . 108
Clef à court circuit . . . 337
— de décharge . . . 339
— de Dickenson . . . 522
— de Saunders . . . 507
— de Smith . . . 521
— (Double) . . . 338
Comité d'enquête de 1859 . . . 25
— des unités électriques B. A . . . 26
Commutateurs inverseurs . . . 342
Composition et fabrication des câbles sous-marins . . . 55
Condensateurs . . . 336
— sur les câbles sous-marins (Intercalation de) . . . 470
Conducteur central des câbles . . . 55
— (Fabrication du) . . . 64
— (Forme du) . . . 60
Conductibilité . . . 58
Cordages pour bouées et pour dragues . . . 207
Courant du câble . . . 405
Courants de polarisation et telluriques . . . 407
Croisières scientifiques . . . 247
Cuivre (Propriétés physiques du) . . . 55
Cuves . . . 181
— (Lovage des câbles dans les) . . . 184

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D

Douvres à Calais (1er câble de) 5
— (2e —) 7
Duplex. — (Voir transmission.) . . . . . .
Dynamomètre de pose 195
— relèvement 203
Dynamomètres (Graduation des) 195

E

Ebonite 101
Electromètre à quadrants de sir W. Thomson 323
Enveloppe isolante des câbles 66
Enveloppes de toile et composition bitumineuse 137
Epissures 160
— des armatures en fer 171
Essais électriques des câbles sous-marins 307
— de — posés (Résultats des) 439
Exploitation des lignes sous-marines 461

F

Fautes (Détermination de la position des) 403
— — 1re catégorie. Méthode d'Anderson et Kennelly . 411
— — — — d'Ayrton et Perry . . . 419
— — — — de Blavier 410
— — — — de Clark 413
— — — — de Jenkin 421
— — — — de la boucle 426
— — — — de Lacoine 414
— — — — de Siemens 417
— — — — de Warren 430
— — — Corrections de Hockin 423
— — 2e catégorie. Mesure par le pont de Wheatstone . 437
— — — Méthode de Clark 432
— — — — par la chute des potentiels 433
— — — — de Kempe 438
— — — — de Kennelly 444
— — — — de Lumsden 434
— — — — de Mance 440
— — 3e catégorie. 1er cas. Méthodes diverses . . . 448
— — — 2e — Méthode d'Ayrton et Perry . 449
— Détermination de la position de deux fautes existant simultanément 437
Faux zéro 362
Fer (Fils de) 115
— — Essais à la torsion 120
— — — traction 117

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Figure de mérite des galvanomètres 321
— (Mesure de la). 351
Freins de la machine de pose 192
— relèvement 201

G

Galvanomètre apériodique de Deprez et d'Arsonval. 318
— — Thomson 317
— astatique différentiel de Thomson. 314
— balistique. 320
— de Clark 308
— marin de Thomson 319
— ordinaire à miroir. 309
Galvanomètres (Mesure de la résistance des). 348
Glu marine. 116
Golfe persique (Câble du). 33
Grappin à branches coupantes 217
— Jamieson. 216
— Kingsford. 220
— Lambert 218
Grappins divers. 213
Gutta-percha (Fabrication des âmes en). 79
— perfectionnée de W. Smith 94
— (Production de la). 66
— (Propriétés physiques et chimiques de la) 74

H

Historique de la télégraphie sous-marine 1
Holyhead à Howth (Câble de) 9

I

Immersion des câbles sous-marins 259
— d'atterrissement. 260
— de grands fonds. 275
— (Essais pendant l'). 392
— (Théorie mécanique de l') 266
Indes (Câbles de la mer Rouge et des). 24
Inscription des résultats des essais électriques. 398
Isolement de la gutta-percha (Résistance d'). 76
— du caoutchouc — 103
— (Mesure de l') — 369

J

Jonction des cuivres (Méthodes de) 163

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

K

Kérite 108

L

Longueur de câble lové dans une cuve (Calcul de la) 187

M

Machine à sonder de sir W. Thomson 235
— de pose des câbles sous-marins 188
— de relèvement — 201
Maillons de jonction 209
Malte à Alexandrie (Câble de) 27
— Corfou — 15
Manipulateur morse à décharge, système Farjou 491
— Lacoine 490
Mesures électriques des câbles sous-marins 359
— piles et des galvanomètres 343
odule de rupture 157

N

Navires télégraphiques 177
Nigrite 108
Noire (Câble de la mer) 14

O

Ondulateur de Lauritzen 325
Oran à Carthagène (Câble d') 30
Ozokérite 107

P

Paraffine 107
Paratonnerres 291
Passage d'un câble de l'arrière à l'avant d'un navire ou inversement 205
Phono-signal 302
Piles d'expériences 342
— (Mesure de la force électromotrice des) 351
— — résistance intérieure des 345
Plombs de sonde 240
Portpatrick à Donaghadee (Câble de) 9
Pose des câbles. — (Voir Immersion) . . . . . .

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pression (Variation de la résistance électrique de la gutta-percha avec la) 77
Propagation du flux électrique dans un conducteur cylindrique limité pendant la période variable. 462
Protection électrique des câbles (Systèmes de). 404

Q

Quadruplex (Transmissions) 544

R

Radiomètre de Crookes pour le contrôle des transmissions (Emploi du) 508
Récepteurs à miroir. 504
Relais Brown-Allan 495
— d'Arlincourt-Willot avec décharge, système Rambaud 501
— de décharge 488
— Rambaud. 497
Réparation des câbles sous-marins. 282
— Opérations à la mer 294
Résistance électrique des conducteurs en cuivre 58
— du conducteur d'un câble (Mesure de la) 359
— d'isolement de la gutta-percha 76
— — du caoutchouc 103
— mécanique des câbles à la traction (Essais de la). 148
— — des fils de fer. 115
— — — (Essais de la) 117
— — du chanvre. 113
— spécifique du diélectrique d'un câble (Mesure de la) 385
Retenue (Appareils de). 188
Revêtement extérieur des câbles 111
Roue de relèvement. 203
— d'immersion. 199
Rouge et des Indes (Câbles de la mer). 24

S

Sardaigne à Bône (Câble de la). 9
Shunts. 321
Signaux bridés. 470
Siphon-recorder. 509
Sondages. 234
— volants 243
Sonde (Plombs de) 240
Sonder (Machine à). 235
Soudure des âmes. 160
— en caoutchouc. 170
— en gutta-percha 167
Soudures (Essais des) 391
— provisoires. 170

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Spécifications de câbles sous-marins (Table des) 174
Spezzia à la Corse (Câble de la) 9

T

Tambour de pose 190
Température (Variation de la résistance électrique de la gutta-percha avec la . . . 77
— — du caoutchouc — . . . 103
— — du cuivre — . . . 58
— des eaux de la mer 247
Tension d'un câble durant son relèvement (Calcul de la) 300
Tensions (Appareil enregistreur des) 198
Théorie mécanique de l'immersion des câbles 266
Thermomètres sous-marins 248
Toulon à Alger (Câble de) 28
Transmission des signaux (Théorie de la) 462
— — Application au câble atlantique de 1869 . . 477
— (Vitesse de) 481
Transmissions duplex 526
— Méthode d'Ailhaud 534
— — d'Anderson et Harwood 533
— — de Muirhead 528
— — de Stearns 533
— quadruplex 544

V

Vitesse de transmission des signaux 481

W

Wray (Composition) 106

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ERRATA

Page	168,	ligne	27,	*au lieu de* :	ligne	*lire* : bande
—	186	—	15	—	milcu	— milieu
—	195	—	30	—	Soient, effet,	— Soient en effet
—	197	—	8	—	$tg\,\alpha = \frac{1}{d}$	— $tg\,\alpha = \frac{l}{d}$
—	218	—	9	—	bras A	— bras A′
—	239	—	10	—	A	— B
—	244	—	12	—	l ABC	— $l =$ ABC
—	256	—	8	—	10° 6	— 18° 6
—	268	—	28	—	A′A′	— AA′
—	269	équation n° 5		—	n^2	— u^2
—	285	ligne	33	—	mille	— milles
—	305	—	27	—	249	— 252
—	312	formule (3)		—	$\left(\frac{n}{2d}\right)$	— $\left(\frac{n}{2d}\right)^2$
—	348	—	9	—	d,	— d_1
—	355	*au lieu de* : $iR + i_1R_1 - E - E_1 + 0$			*lire* :	$iR + i_1R_1 - E - E_1 = 0$
—	362	ligne	15	*au lieu de* :	$\frac{1}{1}$	— $\frac{1}{10}$
—	368	—	15	—	celle	— β celle
—	375	—	34	—	J et J	— J et J′
—	414	—	5	—	$V_1 - V$	— $V_1 - V_2$
—	416	—	21	—	$e' = e'$	— $e' = e'_1$
—	464	formule (10) *lire* : $\tau = \frac{\alpha^2 l^2}{\pi^2} \log_e \frac{4}{3}$				
—	478	ligne	12	*au lieu de* :	10	*lire* : 10 τ
—	527	—	37	—	imaginés	— imaginé

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires