

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 n° 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 - https://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](mailto: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 DE LA GRANDE MONOGRAPHIE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Exposition universelle. 1900. Paris
Auteur(s)	France. Ministère du commerce, de l'industrie et du travail
Auteur(s) secondaire(s)	Picard, Alfred (1844-1913)
Titre	Exposition universelle internationale de 1900 à Paris. Le bilan d'un siècle (1801-1900)
Adresse	Paris : Imprimerie nationale, 1906
Collation	6 vol. ; 29 cm
Nombre de volumes	6
Cote	CNAM-BIB 8 Xae 595
Sujet(s)	Exposition internationale (1900 ; Paris) Exposition universelle (1900 ; Paris)
Notice complète	https://www.sudoc.fr/028989961
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?8XAE595
LISTE DES VOLUMES	
	Tome premier. Éducation et enseignement. Lettres. Sciences. Arts
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	Tome deuxième. Mécanique générale. Électricité. Génie civil et moyens de transport
	Tome troisième. Agriculture, horticulture, forêts, chasse, pêche. Industries alimentaires
	Tome quatrième. Mines et métallurgie. Industries de la décoration et du mobilier. Chauffage et ventilation. Éclairage non électrique. Fils, tissus, vêtements
	Tome cinquième. Industrie chimique. Industries diverses. Économie sociale
	Tome sixième. Hygiène. Assistance. Colonisation. Défense nationale

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Auteur(s) volume	France. Ministère du commerce, de l'industrie et du travail
Auteur(s) secondaire(s) volume	Picard, Alfred (1844-1913)
Titre	Exposition universelle internationale de 1900 à Paris. Le bilan d'un siècle (1801-1900)
Volume	Tome deuxième. Mécanique générale. Électricité. Génie civil et moyens de transport
Adresse	Paris :Imprimerie nationale, 1906
Collation	1 vol. ([4]-406 p.) ; 29 cm
Nombre de vues	410
Cote	CNAM-BIB 8 Xae 595 (2)
Sujet(s)	Exposition internationale (1900 ; Paris)
Thématique(s)	Expositions universelles
Typologie	Ouvrage
Langue	Français
Date de mise en ligne	14/09/2005
Date de génération du PDF	06/02/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://www.sudoc.fr/028989961
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?8XAE595.2

EXPOSITION UNIVERSELLE INTERNATIONALE DE 1900

A PARIS

LE BILAN D'UN SIÈCLE

(1801-1900)

7 815 8° 2ae 595-2
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DU COMMERCE, DE L'INDUSTRIE ET DU TRAVAIL

EXPOSITION UNIVERSELLE INTERNATIONALE DE 1900
À PARIS

LE BILAN D'UN SIÈCLE
(1801-1900)

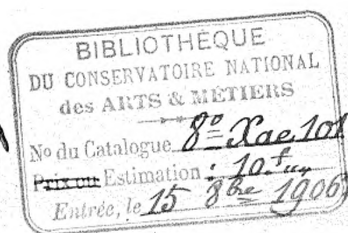
PAR

M. ALFRED PICARD

MEMBRE DE L'INSTITUT, PRÉSIDENT DE SECTION AU CONSEIL D'ÉTAT
COMMISSAIRE GÉNÉRAL

TOME DEUXIÈME

MÉCANIQUE GÉNÉRALE. — ÉLECTRICITÉ. — GÉNIE CIVIL
ET MOYENS DE TRANSPORT



PARIS
IMPRIMERIE NATIONALE

M CMVI

LE BILAN D'UN SIÈCLE

(1801-1900)

CHAPITRE VI.

MÉCANIQUE GÉNÉRALE.

§ 1. GÉNÉRATEURS DE VAPEUR.

1. Généralités. — Les chaudières présentent des dispositions extrêmement variées. Cette diversité de types se justifie par la diversité des conditions auxquelles doivent répondre les générateurs, suivant les cas.

Parmi les éléments caractéristiques des chaudières, il en est un qui a une importance capitale : le volume du réservoir d'eau, véritable magasin de force motrice destiné à pourvoir aux irrégularités dans la combustion et dans la dépense de vapeur. Ce réservoir, considérable pour les machines fixes devant donner un travail soutenu et de longue durée, est, au contraire, réduit pour les machines dont l'effort est temporaire ou qui exigent une mise en pression rapide.

D'autres éléments entrent en ligne de compte dans le choix des générateurs et acquièrent parfois une influence prépondérante. Telles sont les considérations d'emplacement et de légèreté, pour les machines marines et les locomotives; telles sont aussi les questions relatives au prix d'achat dans ses rapports avec les hautes pressions aujourd'hui mises en jeu, à l'étendue des garanties contre les explosions, à la nature de l'eau d'alimentation, à l'instruction et à l'habileté des chauffeurs, etc.

En même temps que se modifiait et se développait la machine à vapeur, les chaudières ont subi des changements tout aussi remarquables.

Au premier rang des progrès du siècle, il y a lieu de placer l'amé-

lioration incessante du métal et de sa mise en œuvre. Grâce à l'évolution de la métallurgie, ainsi qu'au développement des essais méthodiques et précis sur les métaux, l'industrie de la construction a pu obtenir des matières plus parfaites, satisfaisant d'une manière rigoureuse aux conditions requises. L'acier, dont une application était apparue à l'Exposition universelle de 1855, mais sur lequel des explosions avaient jeté la défaveur, s'est peu à peu substitué au fer. Des perfectionnements considérables ont été apportés à l'emboutissage et à la rivure, maintenant exécutés par des moyens mécaniques.

La théorie de la vaporisation s'est complétée. Nous devons aux magnifiques recherches de Regnault des données physiques très exactes sur la vapeur d'eau; les tables dressées par l'illustre expérimentateur sont toujours consultées; elles ont fourni une base solide à la théorie mécanique de la chaleur. Suivant avec succès la voie ouverte par Regnault, les savants praticiens de la Société industrielle de Mulhouse sont parvenus à éclairer d'une vive lumière les phénomènes qui s'accomplissent dans les générateurs, et spécialement la transmission du calorique à travers les parois en métal. Ils ont montré que la variété de formes et de dispositions des chaudières est loin de produire des variations corrélatives dans le rendement en eau vaporisée.

Entre autres faits récents, on peut signaler l'augmentation rapide de la pression : c'est ainsi que le timbre des générateurs pour les groupes électrogènes de l'Exposition universelle de 1900 avait pu être fixé à 11 kilogrammes. D'autre part, les chaudières à tubes d'eau se sont répandues, notamment comme surchauffeurs et réchauffeurs. Enfin un redoublement de précautions a sensiblement diminué le nombre des accidents.

Dans l'état actuel, avec une bonne installation de générateurs, les calories utilisées représentent 60 à 70 p. 100 de la chaleur développée par la combustion. La production horaire de vapeur par mètre carré de surface de chauffe varie dans des limites étendues et approche en moyenne de 15 kilogrammes.

2. Types divers de générateurs. — Pendant longtemps, la chaudière classique, en France, a été la chaudière à grand corps et

à foyer extérieur, comportant un corps cylindrique horizontal avec fonds emboutis et dôme pour la prise de vapeur, deux bouilleurs (quelquefois un ou trois) placés au-dessous du corps principal et s'y reliant par des cuissards, un fourneau à trois ou quatre parcours de flammes.

Ce type est encore très répandu : on doit considérer comme s'y rattachant la plupart des 20,000 chaudières non tubulaires à foyer extérieur que la statistique française enregistrait à la fin de 1900, sur un total de 91,300 générateurs employés en dehors des chemins de fer, tramways, automobiles et bateaux. Ses avantages sont la facilité de visite et de nettoyage, ainsi que la stabilité du régime. En revanche, il a l'inconvénient d'être encombrant, d'exiger un poids considérable de métal par rapport à la surface de chauffe, de nécessiter un gros cube de maçonnerie, d'étendre la surface rayonnante du fourneau; l'importance de sa réserve d'énergie rend les explosions particulièrement redoutables. Quelques-uns de ces défauts sont d'ailleurs susceptibles de correction.

Autrefois, des chaudières faites d'un corps cylindrique vertical se rencontraient fréquemment dans les forges, où elles utilisaient les flammes sortant des fours à puddler. La visite en était difficile et plusieurs catastrophes y ont fait renoncer.

Les chaudières à grand corps et à foyer intérieur sont classiques en Angleterre. En général cylindriques et horizontales, elles contiennent un ou plusieurs carneaux de même forme qui les parcourent sur toute leur longueur et qui livrent passage aux gaz du foyer. Souvent, le foyer intérieur se combine avec des retours de flammes extérieurs.

À ce système se rattachent : les chaudières de Cornouailles, pourvues d'un carneau unique; les chaudières du Lancashire, munies de deux carneaux; les chaudières Fairbairn, présentant deux corps cylindriques dont chacun renferme un carneau et que des cuissards mettent en communication avec un réservoir commun superposé; les chaudières Galloway, dans lesquelles les deux carneaux cylindriques se réunissent au delà de la grille en un conduit unique ayant ses deux

larges faces entretoisées par une série de tubes coniques à circulation d'eau, de manière à accroître la surface de chauffe et l'effet utile.

Ici, la surface de chauffe directe est d'une remarquable efficacité; les déperditions par rayonnement sont beaucoup moindres que pour le type précédent. Mais la construction se complique et il devient impossible de fixer arbitrairement la largeur des grilles.

On fait aussi, surtout pour les appareils mobiles, des chaudières verticales à grand corps et foyer concentrique intérieur; une épaisse couche d'eau surmonte le ciel du foyer; au-dessus est une chambre de vapeur de capacité convenable. La surface de chauffe peut être augmentée par des bouilleurs traversant le foyer; ces bouilleurs servent, en outre, à brasser les gaz.

Créée par Marc Séguin en 1828 et appliquée pour la première fois d'une façon pratique par R. Stephenson, la chaudière tubulaire, avec parcours de flammes à l'intérieur des tubes, est devenue le type usuel pour les locomotives et pour des modèles nombreux de locomobiles; grâce à d'ingénieuses dispositions et à l'emploi des condenseurs par surface, elle a trouvé des applications multiples dans la marine; les manufactures y ont eu souvent recours.

La chaudière de locomotive se caractérise par une boîte à feu métallique, placée à l'une de ses extrémités et enveloppée d'eau sur toutes ses faces, et par une série de tubes que parcourent les flammes en se rendant vers la boîte à fumée; le faisceau tubulaire plonge dans la masse d'eau que contient un corps cylindrique extérieur. Faible volume, légèreté, grande puissance de vaporisation, tels sont les avantages essentiels du système.

Ordinairement, les tubes sont horizontaux. Quelques constructeurs jugent avantageux d'adopter la position verticale ou inclinée; dans ce cas, la partie supérieure du faisceau traverse le réservoir de vapeur et joue le rôle de surchauffeur.

Pour les chaudières fixes ou mi-fixes, le système tubulaire se combine assez fréquemment avec des éléments empruntés aux systèmes classiques anciens. C'est ainsi que l'adjonction d'un faisceau tubulaire dans le corps cylindrique des vieilles chaudières à foyer extérieur en-

gendre le type semi-tubulaire, ayant sur le type primitif l'avantage d'être plus ramassé et moins encombrant, mais n'offrant pas la même simplicité. L'Allemagne et l'Autriche combinent, suivant le système Tischbein, une chaudière à tubes-foyers intérieurs et une chaudière à tubes de fumée placée au-dessus de la première : établis de la sorte, les générateurs occupent une superficie restreinte et présentent une surface de chauffe étendue; ils ont, en revanche, le défaut d'une grande hauteur et imposent la surveillance de deux niveaux d'eau. Farcot avait imaginé et les Allemands ont repris un modèle à foyer intérieur cylindrique prolongé par un faisceau tubulaire. Thomas et Laurens doivent être regardés comme les initiateurs de types actuellement en usage et comportant : 1° pour les appareils fixes à grand volume d'eau, un corps inférieur avec tube-foyer axial et faisceau tubulaire concentrique, et un corps supérieur relié au précédent; 2° pour les appareils mi-fixes et les locomobiles, un corps unique dans lequel un faisceau tubulaire surmonte le tube-foyer.

Les tubes nécessitent de fréquents nettoiyages. Il y a là une opération assez difficile. Divers artifices, dont l'un notamment imaginé par Bérendorf, ont été mis en œuvre pour rendre amovibles quelques-uns des tubes. Farcot, Thomas et Laurens, d'autres constructeurs encore, sont allés plus loin et ont fait amovible l'ensemble du faisceau.

Une famille de générateurs, dont le rôle a singulièrement grandi, est celle des générateurs à tubes d'eau. Ils diffèrent des générateurs tubulaires en ce que les tubes, chauffés extérieurement par la flamme, sont parcourus par l'eau et la vapeur.

Le premier générateur de ce genre paraît dû à l'américain Nathan Read (1791). En 1804, John Stevens, également américain, reprit l'idée et l'appliqua à la navigation. Plus tard, les chaudières tubulées servirent de thème aux recherches de nombreux ingénieurs, notamment de Woolf et Perkins en Angleterre, du docteur Alban en Allemagne, du baron Séguier en France.

Grâce aux garanties qu'elles offrent contre les explosions, les chaudières à tubes d'eau se sont peu à peu répandues en même temps que l'emploi des hautes pressions. Elles ont pris place dans beaucoup

d'installations qui demandent des appareils sûrs et puissants sous un faible volume et un poids restreint. Leur principal défaut était la difficulté de maintenir constants le niveau de l'eau et la pression : on y a remédié par le réglage automatique de l'alimentation et du tirage.

Un type universellement réputé est celui des chaudières Belleville, qui comporte des tubes d'un diamètre voisin de 0 m. 10 associés en série. Ses origines remontent à 1850 : Belleville poursuivait alors la solution du problème de la vaporisation instantanée au moyen de très petits tubes à la base desquels était injectée de l'eau; les appareils combinés dans ce but péchaient par l'instabilité de leur fonctionnement et la rapidité de leur destruction. Avec les derniers perfectionnements de 1896, le générateur Belleville est essentiellement constitué de la manière suivante : le faisceau se compose d'une suite de serpentins dessinant des sortes d'hélices à base rectangulaire oblongue et formés par la réunion de tubes rectilignes; ces serpentins partent, à leur base, d'un collecteur horizontal d'alimentation et débouchent, au sommet, dans un réservoir de vapeur ou épurateur garni de cloisons en chicanes et de peignes pour retenir et égoutter le liquide; un ou deux tuyaux de retour d'eau relient l'épurateur au collecteur alimentaire et se terminent par des déjecteurs destinés à recueillir les dépôts; l'alimentation se règle automatiquement par une soupape équilibrée sous la dépendance du flotteur suspendu dans la colonne de niveau, et le tirage par un levier que commande un robuste manomètre. À la chaudière est adjoind un réchauffeur d'eau ou économiseur, dont la structure est semblable à celle du faisceau vaporisateur, mais a de moindres dimensions. Un dernier serpentín, auquel les gaz du foyer arrivent après avoir traversé le faisceau vaporisateur et avant de parvenir à l'économiseur, sèche ou surchauffe la vapeur.

Tandis que dans le type Belleville la circulation de liquide correspond seulement à la quantité d'eau débouchant avec la vapeur au sommet des éléments et reste dès lors limitée, la plupart des chaudières à tubes d'eau appartiennent au système de la circulation libre. Le faisceau vaporisateur se compose de tubes parallèles, notablement inclinés sur l'horizon et reliés entre eux, tant à l'avant qu'à l'arrière, soit par une série de collecteurs verticaux ou à peu près tels, juxtaposés les

uns aux autres, soit par un caisson à faces planes entretoisées. Aux deux extrémités du faisceau, les jeux de collecteurs verticaux ou les caissons communiquent avec un réservoir supérieur, rempli d'eau jusqu'à mi-hauteur. Les dispositions de détail varient selon que la chaudière est à éléments verticaux juxtaposés ou à lame d'eau; elles se diversifient même dans chacun de ces systèmes. Comme exemples, on peut citer : pour le premier système, les générateurs Babcock et Wilcox, Roser; pour le second système, les générateurs Steinmüller, Simonis et Lanz, Petry-Dereux, Fitzner et Gamper, Biérix et consorts, Mathot, de Naeyer.

Field a créé en 1865 un modèle spécial, dont l'idée première semble appartenir à Perkins (1831). L'élément essentiel est un tube vertical fermé par le bas et ouvert par le haut, qui communique librement avec le réservoir d'eau et dans lequel se trouve un tube mince concentrique, ouvert aux deux bouts; les vapeurs se dégageant entre les deux tubes déterminent un appel et par suite une circulation énergique du liquide. Plusieurs types de générateurs à circulation libre sont munis de tubes Field inclinés : tel est le cas des générateurs Collet, Niclausse, Dürr, Montupet, etc.

Dans les modèles Normand, Du Temple-Guyot, Salignac, etc., spécialement destinés aux torpilleurs et contre-torpilleurs, les tubes d'eau ont un diamètre beaucoup moindre que dans les modèles précédents et sont contournés. Le nettoyage de ces tubes ne s'opère que par la circulation intensive. À l'extrémité de l'échelle se trouve le type Serpollet, où la quantité d'eau devient insignifiante et où la vaporisation est instantanée.

Le mariage des systèmes à tubes d'eau avec les anciens systèmes classiques a engendré des modèles particuliers, comme la chaudière Climax à foyer extérieur (corps vertical hérissé de tubes vaporisateurs), les chaudières Schuchow à foyer intérieur (corps vertical et tubes entre-croisés traversant le foyer), etc.

Dans les générateurs à tubes d'eau, le principal danger résulte des désassemblages. Ce sont les assemblages à emmanchement vissé qui donnent le plus de garanties, pourvu que le filet ait une profondeur suffisante.

3. Réchauffeurs d'eau d'alimentation. Surchauffeurs de vapeur. Appareils de sûreté. — Pour que la transmission de la chaleur du foyer à travers les parois métalliques des générateurs conserve une activité suffisante, il faut un écart de 100 degrés au moins entre la température des gaz et celle de l'eau. Ainsi, au moment où ils atteignent l'extrémité de la chaudière, les gaz ont encore une puissance calorifique fort élevée. L'idée est venue naturellement d'employer cette puissance au chauffage de l'eau d'alimentation, en plaçant à la suite du générateur un appareil dit *réchauffeur*, dans lequel l'eau circulerait avant d'aller à la chaudière et suivrait une direction inverse de celle des gaz. Cavé, puis Farcot (1845) employèrent des cylindres latéraux, généralement abandonnés aujourd'hui. La Société industrielle de Mulhouse étudia de près la question et ouvrit la voie à une meilleure utilisation de la chaleur perdue. Maintenant, on a surtout recours à des faisceaux de tubes : l'un des systèmes consacrés est celui des *economisers* Green. Des procédés mécaniques permettent l'enlèvement facile des dépôts de suie qui ne tardent pas à recouvrir la surface de chauffe.

Très simple en théorie, la surchauffe de la vapeur se heurte en fait à des difficultés, au danger d'altération des joints et des lubrifiants, à l'extrême sensibilité calorifique de la vapeur. Cette sensibilité est d'autant plus grande que les surchauffeurs ont nécessairement des dimensions restreintes. Le problème, naguère jugé presque insoluble, a été repris non sans succès depuis 1890, surtout pour les moteurs à distribution par soupapes. De nombreux surchauffeurs figuraient à l'Exposition de 1900. Les appareils sont généralement formés de tubes d'un petit diamètre et placés aussi près que possible du moteur, ce qui oblige quelquefois à les doter d'un foyer indépendant; le sens du cheminement de la vapeur est le même que celui du mouvement des gaz. Différents procédés ont été imaginés pour le réglage de la surchauffe : manœuvre d'un registre, injection de vapeur saturée, etc.

Des perfectionnements ont été apportés aux appareils qui, depuis longtemps, servent pour le contrôle du niveau de l'eau et pour celui de la pression, ou assurent le dégagement automatique de la vapeur, quand la pression limite est atteinte : tubes de verre, robinets de

jauge, flotteurs, manomètres métalliques avec ou sans enregistrement, soupapes de sûreté à évacuation directe ou indirecte, sifflets avertisseurs. Aux clapets automatiques de retenue d'alimentation se sont joints, surtout après la promulgation du décret réglementaire de 1886, les clapets automatiques d'arrêt de vapeur, qui s'interposent entre les chaudières d'une même batterie et, en cas de rupture d'un des générateurs, empêchent la vapeur des autres chaudières de l'envahir.

4. Alimentation; épuration des eaux. — Les chaudières sont alimentées au moyen de pompes ou d'injecteurs. On emploie ordinairement les pompes quand l'eau alimentaire sort du condenseur : tantôt la pompe est solidaire de la machine principale, tantôt elle a un moteur indépendant et constitue alors avec lui un « petit-cheval »; les petits-chevaux ont presque toujours leurs corps de pompe en prolongement des cylindres à vapeur; souvent ils reçoivent un arbre et un volant, qui facilitent la distribution et permettent la détente. Bien que les injecteurs reposent sur un principe connu et vérifié par l'expérience dès les premières années du siècle, celui de l'entraînement des fluides par un jet à grande vitesse, il est de toute justice d'en attribuer l'entière paternité à Giffard : ce célèbre inventeur a su créer immédiatement un appareil complet, pourvu de moyens de réglage, s'adaptant sous une forme unique aux circonstances les plus variées de pression et de température. L'injecteur Giffard est manœuvré à la main; il réchauffe l'eau alimentaire par de la chaleur généralement prise à la chaudière. Diverses modifications y ont été apportées, notamment dans le but d'en simplifier le jeu ou la construction; souvent on a obtenu cette simplification, en supprimant l'une des fonctions de l'appareil primitif, par exemple l'aspiration de l'eau à une certaine hauteur au-dessus de la bêche alimentaire.

Si, en beaucoup de cas, les inconvénients des dépôts peuvent être atténués par des dispositions judicieuses de la chaudière et par l'alimentation dans la vapeur, il est d'autres cas où l'épuration préalable de l'eau alimentaire s'impose absolument. Pour les machines marines et pour certaines machines terrestres munies de condenseurs par sur-

face, un filtrage suffit généralement : ce filtrage élimine l'huile provenant du graissage; au besoin, un bouilleur fournit l'eau douce nécessaire à la réparation des pertes. Pour les machines terrestres empruntant leur alimentation à un puits, à une rivière, à un condenseur par mélange, les procédés d'épuration varient selon la nature de l'eau : on recourt au chauffage à l'air libre, au traitement chimique, à la sédimentation et au filtrage; la séparation des précipités constitue souvent une opération fort délicate.

5. Production de la chaleur. — Dans la très grande majorité des cas, le combustible est la houille et cette houille se brûle sur des grilles ordinaires, dont les dispositions doivent être appropriées à la nature du charbon. Plusieurs modèles de grilles mobiles, oscillantes, pour le décrassage des feux, ont été imaginés et employés, sans se répandre beaucoup.

Le chargement automatique des foyers a fait l'objet de nombreuses recherches. Malgré ses avantages, notamment au point de vue de la régularité d'allure, il ne s'est pas implanté en France. Certaines installations de la Grande-Bretagne et des États-Unis en sont au contraire dotées, ce qui s'explique par la constance de qualité du charbon. Les appareils assurent l'arrivée du combustible, son cheminement, l'élimination de la cendre et le décrassage de la grille.

Trop souvent, la combustion incomplète de la houille, surtout quand le combustible est gras et impur, provoque le déversement par la cheminée d'une fumée noire, dont les inconvénients sont manifestes dans les centres de population. Les prohibitions de police édictées à cet égard n'ont eu que peu de résultats. Ce n'est pas que les inventions aient manqué, car la liste serait longue des dispositifs proposés pour résoudre le problème et fondés sur le chargement et la combustion méthodiques, sur le brassage des gaz à une haute température, sur le forçement du tirage, etc. Maniés avec soin, la plupart de ces dispositifs sont réellement fumivores; cependant ils entrent peu dans la pratique. D'ailleurs, les chauffeurs consciencieux et habiles peuvent, en général, sinon empêcher complètement le mal, du moins arriver au degré de fumivorité voulu.

L'émission des produits de la combustion dans l'atmosphère des grandes villes est susceptible non seulement d'incommoder, mais aussi de nuire par les gaz irrespirables et délétères qui se mélangent à l'air. En dépit de son intérêt, cette question a peu sollicité l'attention du public.

Dans certains pays, les hydrocarbures liquides, en particulier le résidu lourd de la distillation du naphte ou mazout, sont substitués à la houille. Cette substitution a pour effet de simplifier la main-d'œuvre, de faciliter l'alimentation continue du foyer, de supprimer les émissions de fumées et de gaz délétères. Habituellement, le liquide est pulvérisé et intimement mélangé à l'air.

Les gaz pauvres des hauts fourneaux se brûlent au-dessus d'une grille où on entretient un feu de houille.

C'est le tirage naturel de la cheminée qui, le plus fréquemment, fournit l'air indispensable à la combustion. Quelquefois des tuyères sont utilisées, moins pour activer le tirage que pour prévenir la fumée. Le tirage forcé proprement dit se réalise tantôt par échappement dans la cheminée de la vapeur sortant des cylindres (comme dans les locomotives et dans nombre de locomobiles ou de machines demi-fixes), tantôt par insufflation d'air au moyen d'un ventilateur (notamment dans les chaudières des torpilleurs).

6. Canalisations de vapeur. — Au fur et à mesure qu'augmentaient la puissance des installations et la pression de la vapeur, des précautions de plus en plus grandes ont dû être prises dans l'établissement des canalisations de vapeur. Il a fallu abandonner la fonte, n'employer qu'avec réserve le bronze et le cuivre, recourir surtout au fer homogène et à l'acier doux, rivés, soudés ou étirés sans soudure, faire les pièces spéciales en acier moulé. Quand les joints comportent une garniture de matière plastique, les préférences actuelles sont pour l'amiante. Des dispositifs soignés doivent permettre le jeu facile de la dilatation. Les dangers de rupture auxquels sont exposées les boîtes des soupapes d'arrêt appellent toute l'attention des constructeurs. Rien n'est négligé pour prévenir les coups d'eau, spécialement par des purgeurs automatiques. On fait usage d'enveloppes

calorifuges variées, mais toujours légères, mauvaises conductrices de la chaleur, résistant bien à l'action destructive des hautes températures (feutre, liège, amiante, laine de scorie, céramique).

L'Exposition universelle de 1900, pour le service de laquelle fonctionnaient quatre-vingt-douze chaudières capables de fournir à l'heure 235,000 kilogrammes de vapeur, montrait un modèle de canalisation d'exceptionnel développement. Mon rapport général administratif et technique contient des indications précises, que je m'abstiens de reproduire ici, au sujet de cette canalisation et de ses nombreux appareils : collecteurs formant séparateurs d'eau et bouteilles de distribution, vannes, boîtes de dilatation, bouteilles de purge, purgeurs automatiques, etc. Le calorifuge consistait en enroulements à plusieurs tours d'un papier ondulé sur une face, lisse sur l'autre et convenablement ignifugé; ces enroulements formaient un magasin d'air; une corde d'amiante séparait le papier des tuyaux.

7. Associations de propriétaires d'appareils à vapeur. — Il est juste de rappeler ici l'action tutélaire qu'exercent, au point de vue de la sécurité, les associations de propriétaires d'appareils à vapeur. Ces associations sont nées en Angleterre : la première (Manchester steam users Association), fondée par W. Fairbairn, date de 1855. De là, l'institution s'est successivement répandue dans les principaux pays de l'Europe continentale. Le premier groupement français (Association alsacienne des propriétaires d'appareils à vapeur) a été constitué à Mulhouse en 1867; aujourd'hui, nous avons onze associations, qui surveillent 21,500 chaudières, réparties dans 6,960 établissements.

Certaines associations ont le caractère de sociétés d'assurances; d'autres sont purement techniques. Toutes contribuent à la bonne construction des générateurs de vapeur. On doit à leur union internationale les règles de Wurtzbourg sur les conditions de recette des matériaux destinés à l'établissement des chaudières et les règles de Hambourg sur la mise en œuvre de ces matériaux. Elles procèdent à des visites périodiques et assurent ainsi un entretien satisfaisant des appareils.

§ 2. MACHINES À VAPEUR.

1. Progrès généraux réalisés pendant la première moitié du XIX^e siècle. — Le commencement du XIX^e siècle trouva la machine à vapeur en possession de ses organes essentiels et prêtant déjà un large concours au travail industriel. Toutes les formes importantes de machines étaient inventées. Watt avait perfectionné, avec l'aide de Murdoch, la machine d'épuisement ainsi que la machine d'atelier; il avait imaginé la machine à fourreau, tandis que Murdoch créait la machine oscillante et le tiroir glissant; il avait fait un modèle de locomotive, pendant que Hornblower produisait la machine à deux cylindres. Les diverses tentatives d'emploi de la vapeur pour la navigation, bien que n'ayant pas abouti, permettaient d'entrevoir le succès final. De grands ateliers de construction allaient surgir, par suite de l'expiration des brevets grâce auxquels la maison Boulton et Watt venait d'accaparer pendant un quart de siècle la fourniture des machines à vapeur.

À partir de ce moment, l'histoire de la machine va se confondre dans une large mesure avec celle de ses applications : l'élévation de l'eau, l'exploitation des mines, la métallurgie, la mise en mouvement de l'outillage industriel, les transports par voie de terre ou par voie d'eau, etc. Des indications sur les usages de la vapeur, en ce qui concerne les industries spéciales où le moteur ne peut être détaché de l'outil qu'il actionne, prendront place dans d'autres parties de cet ouvrage. Je me bornerai ici à envisager la machine à vapeur, en me plaçant à un point de vue plus général et en faisant autant que possible abstraction de l'organe récepteur.

Deux faits caractéristiques se sont accentués à partir du commencement du siècle : l'augmentation graduelle des pressions et celle de la détente. En même temps s'est manifestée une tendance à supprimer le balancier, à adopter la connexion directe, à simplifier et à ramasser les formes des machines.

Au temps de Watt, les pressions habituelles ne dépassaient guère la pression atmosphérique. C'est d'ailleurs le propre des machines à

condensation de se prêter aux pressions peu supérieures à celles de l'atmosphère. Mais elles nécessitent une abondante quantité d'eau froide, inconvénient fort appréciable en certains cas, vice absolument rédhibitoire pour les machines locomotives. Afin de se soustraire à la condensation de la vapeur, on a dû recourir aux machines à haute pression.

Le premier projet d'une machine sans condensation qui pût être réellement de quelque utilité pratique se rencontre dans le *Theatrum machinarum* de l'allemand Leupold (publié vers 1725); suivant l'auteur, ce système aurait été proposé par Papin. Dans son brevet de 1769, Watt s'était réservé le droit, « pour le cas où l'eau froide serait rare, de faire marcher les machines à l'aide de la seule vapeur, laquelle « pourrait s'échapper dans l'air après qu'elle aurait produit son effet »; mais il ne paraît pas qu'aucun moteur de cette espèce soit jamais sorti de ses ateliers. L'américain Oliver Evans sut appliquer avec succès les principes posés avant lui; vers 1801, il construisit une machine à haute pression et à échappement libre, qui fut utilisée pour le fonctionnement d'un moulin à plâtre; plus tard, il étendit les applications du nouveau type, en perfectionna les détails et prédit l'avenir réservé aux machines sans condensation. Au delà de la Manche, Trevithick et Vivian conçurent et firent breveter de leur côté, en 1802, une machine à haute pression et sans condensation qu'ils appliquèrent non seulement à la traction des véhicules, mais au forage des roches, au dragage, etc.

Dès lors, la machine à haute pression ne cessa d'être employée. À l'origine, les moteurs de ce genre étaient assez grossièrement établis, mal proportionnés, construits sans précision; leur dépense de combustible atteignait un chiffre fort élevé. Peu à peu, les bons constructeurs arrivèrent à leur donner des proportions heureuses, des formes élégantes et solides; ils y firent usage de matériaux d'excellente qualité, et réduisirent beaucoup les pertes de chaleur et de combustible.

En présence des résultats favorables donnés par les machines à haute pression, on reprit les idées de Hornblower sur la détente

successive de la vapeur dans deux cylindres de diamètres différents. Arthur Woolf réalisa avec succès ce mode de détente par échelons (1804); il fit revivre la machine créée en 1781 par Hornblower, ses deux cylindres parallèles et juxtaposés, ses deux pistons reliés directement au balancier, mais en admettant la vapeur à plus haute tension; il poussa la détente jusqu'à six ou neuf fois le volume initial : les machines d'épuisement établies d'après ses plans ne consommaient, dit-on, que 1 kilogr. 8 de houille par cheval et par heure, tandis que la consommation des machines de Watt ne descendait guère au-dessous de 2 kilogr. 5. Le type de Woolf se propagea rapidement; dès 1815, Edwards l'introduisit en France, où il devint pour ainsi dire classique. Pendant longtemps, la machine de Woolf à balancier subsista sans modification notable dans son dessin général; elle rendit les meilleurs services aux industriels grâce à son allure régulière, à sa marche économique et à son entretien peu coûteux.

Presque au lendemain de la patente de Woolf, en 1805, Willis Earle proposait une machine à deux cylindres inégaux superposés, avec tige commune pour les deux pistons; reproduite plus tard par Sims, cette disposition fut le point de départ d'un type assez répandu de nos jours et connu sous le nom de machine tandem.

Quant aux machines à trois cylindres, elles paraissent avoir été construites pour la première fois par Aitkin et Seel.

Des essais avaient été successivement entrepris par Papin, puis par Cartwright, enfin par Murray (1802), pour supprimer le balancier. Maudslay résolut le problème et fit une machine verticale sans balancier (1807), si séduisante par sa simplicité, sa symétrie et son élégance, qu'il reçut des commandes de toutes les parties du monde.

Suivant la voie ainsi tracée, les constructeurs ne tardèrent pas à asseoir le cylindre à vapeur sur la fondation même et à éliminer la charpente métallique qui, dans le système de Murray et de Maudslay, servait de support au cylindre. Dawes semble avoir exécuté le premier en Angleterre ce type simplifié de machine verticale (1816). Saulnier

s'était efforcé de le répandre en France, dès 1812; des perfectionnements y furent ensuite apportés par J. J. Meyer, de Mulhouse, par Imbert et par Bourdon, de Paris.

La machine à cylindre horizontal paraît avoir été établie en 1801 par Symmington (le même qui s'occupa de navigation à vapeur). Plus tard, on trouve le cylindre horizontal dans la voiture à vapeur de Brunton (1813), dans la machine à haute pression de Perkins (1823), etc. Son adoption générale fut néanmoins retardée par la crainte de voir le cylindre s'user inégalement. Après 1831, quand Stephenson prit le parti d'adapter exclusivement des cylindres horizontaux à ses locomotives, on reconnut que l'importance des inégalités d'usure avait été exagérée et que, d'ailleurs, il était possible d'y remédier en prolongeant la tige du piston pour lui faire traverser les deux fonds du cylindre, en allongeant les boîtes à étoupe, en soignant davantage la garniture du piston, etc. La machine horizontale devint, au moins pour certains usages, le type favori.

Aux divers changements ayant pour objet de simplifier les organes se rattachent les tentatives faites en vue de supprimer la bielle et d'articuler la manivelle sur la tige du piston elle-même. Ce résultat fut obtenu au moyen d'un cylindre oscillant, dont les tourillons creux servaient en même temps à l'entrée et à la sortie de la vapeur. La machine à cylindre oscillant avait été inventée par Murdoch (1785); un Américain, French, paraît y avoir eu recours en 1808, pour la propulsion des navires; toutefois elle ne fut définitivement introduite dans la pratique qu'en 1820 par Cavé, à Paris, et presque simultanément par Manby, au delà de la Manche.

Tandis que s'accomplissaient ces transformations, de grands ateliers de construction (Seraing, le Creusot, etc.) avaient surgi dans différents pays. Les procédés mécaniques se perfectionnaient chaque jour. On arrivait à produire des moteurs susceptibles d'un fonctionnement régulier, à faire des cylindres parfaitement alésés, des pistons bien circulaires, des pièces frottantes convenablement rodées, des organes appropriés aux efforts qu'ils devaient supporter. Les conditions effectives de marche se rapprochaient de plus en plus des conditions théoriques. Tous ces progrès accomplis par les constructeurs, surtout après

la diffusion des machines-outils, ont exercé une influence capitale sur l'abaissement du prix des machines à vapeur et sur le développement de leurs emplois; ils ont aussi facilité singulièrement l'application des découvertes dues aux savants et aux inventeurs.

2. Progrès généraux réalisés pendant la seconde moitié du XIX^e siècle. Situation en 1900. — 1. *Machines à piston*. — Vers le milieu du siècle, la vapeur ne servait pas seulement à actionner l'outillage des usines, à commander des mécanismes fixes de toute sorte; elle constituait, sur terre et sur mer, l'agent propulseur par excellence. Les ingénieurs et le public étaient familiarisés avec ses applications diverses. On connaissait le genre de machine spécialement adapté à chaque usage, et les différents types possédaient déjà plus ou moins exactement la forme et les proportions qu'ils devaient conserver dans la suite. Bien que la théorie des machines à vapeur fût incomplète et que les lois thermodynamiques qui les régissent n'eussent pas reçu leur formule définitive, les constructeurs avaient dégagé empiriquement les principes essentiels au succès pratique, reconnu la valeur relative des nombreux modèles, ramené toutes les variantes à quelques types.

Après 1850, la machine à vapeur n'a cessé d'étendre son domaine. L'allure du progrès s'est toutefois modifiée. Il s'agissait moins de changer les formes originaires, d'ajouter des organes nouveaux, que de réaliser des perfectionnements graduels, d'apporter des améliorations successives aux dispositions, aux proportions, aux arrangements de détail, au rendement. Ce fut « une période de raffinement », caractérisée d'ailleurs par la disparition des types les moins aptes à soutenir la lutte contre leurs concurrents, par la « survivance des mieux organisés », par une tendance à l'uniformité dans le dessin général des moteurs et dans l'agencement de leurs organes.

Quoique parcouru pas à pas et par courtes étapes, l'espace franchi a été néanmoins immense. Pour s'en rendre compte, il suffit de comparer, par exemple, les machines des croiseurs-cuirassés modernes ou des paquebots transatlantiques actuels aux lourds et faibles moteurs de leurs ancêtres.

L'adoption graduelle des hautes pressions et des longues détentees constitue l'un des faits les plus marquants de la seconde moitié du siècle. Elle s'est accentuée, au fur et à mesure que progressaient les détails de construction, les moyens de graissage, l'art de faire les joints. Cette marche continue vers des pressions élevées a eu pour conséquence une économie importante de combustible. Watt, employant la vapeur à la pression de 0 kilogr. 670 au maximum, ne brûlait guère moins de 2 kilogr. 500 par cheval et par heure; les machines de Cornouailles, établies sur le même plan que celles de Watt, mais alimentées par de la vapeur à 3 ou 4 kilogrammes de pression, avec détente au tiers ou au quart, ne dépensèrent plus en moyenne que 1 kilogr. 500 de charbon; la machine d'épuisement compound descendit même à 0 kilogr. 900. L'accroissement des pressions avait en même temps l'avantage de diminuer le poids et l'encombrement de la machine ainsi que de sa chaudière.

M. Hirsch, rapporteur du jury de 1878, évaluait les pressions ordinairement admises à 4 ou 5 kilogrammes effectifs pour les machines à condensation, à 6 ou 7 kilogrammes pour la plupart des machines sans condensation, à 8 ou 10 kilogrammes et même davantage pour certains moteurs demandant par-dessus tout de la puissance et de la légèreté. Les machines à condensation et à pression modérée, encore usuelles en Europe et, dans une certaine mesure, aux États-Unis, quand l'eau était facile à trouver, reculaient devant les machines à haute pression, sans condensation et à détente prononcée; la machine Corliss représentait le type le plus connu de ces moteurs à haute pression, type fort commun en Amérique et souvent reproduit par les constructeurs européens.

En 1889, M. Hirsch, élu pour la seconde fois rapporteur, donnait les chiffres suivants : installations hors des villes, sans sujétions spéciales, 6 à 8 kilogrammes; installations urbaines, 6 à 8 kilogrammes ou 8 à 10 kilogrammes, selon que les machines étaient à condensation ou sans condensation; locomotives, 9 à 11 kilogrammes (le timbre des locomotives compound exposées variant entre 12 et 15 kilogrammes).

À la fin du siècle, la pression de 6 kilogrammes continuait à être

admise dans beaucoup de cas; mais ce n'était qu'un minimum, et la multiple expansion s'accommodait de pressions atteignant ou parfois dépassant 12 kilogrammes. Bien qu'on sût produire la vapeur sous des pressions allant à 18 kilogrammes et au delà, les constructeurs ne franchissaient guère la limite de 12 kilogrammes, à partir de laquelle les difficultés relatives aux canalisations et aux joints devenaient très sérieuses. Pour les grandes usines, d'une puissance totale de 36,000 chevaux indiqués, affectées aux services mécaniques de l'Exposition, le timbre des chaudières avait été fixé à 11 kilogrammes; la plupart des machines fonctionnaient à la plus haute pression possible; des détendeurs ramenaient cependant la pression à 7 ou 8 kilogrammes avant l'admission aux cylindres, quand la vapeur devait alimenter des moteurs monocylindriques.

La détente par échelons a pris un rapide développement, non seulement dans la marine, mais aussi à terre, sous forme de double, triple ou quadruple expansion. Elle se recommande d'autant plus que la pression initiale augmente davantage. Son opportunité et la détermination du nombre des échelons dépendent cependant d'autres éléments que la pression initiale : valeur des espaces morts, propriétés de la distribution, degré d'action des parois, artifices mis en œuvre pour atténuer cette action. De grandes machines à distribution du genre Corliss, à espaces morts très restreints, à enveloppe de vapeur complète et soigneusement purgée, peuvent réaliser une longue détente tout en restant monocylindriques; au contraire, l'emploi des soupapes qui se prêtent moins à la réduction des espaces morts et la distribution par tiroir mû au moyen d'un excentrique appellent la multiple expansion. Celle-ci complique incontestablement le moteur, en accroît le poids et l'encombrement, puisque le cylindre à basse pression atteint à lui seul le volume du cylindre unique d'une machine à simple expansion; elle ralentit les effets du régulateur de vitesse. Ses avantages sont de réduire les condensations à l'admission, de diminuer l'influence des espaces morts, de faciliter la distribution, et leur valeur s'accuse à mesure qu'on élève les pressions et qu'on accélère la rotation des machines.

Aucun lien mathématique n'existe entre le nombre des échelons de la détente et celui des cylindres. Sur les locomotives, pour les laminoirs ou treuils d'extraction, etc., une disposition usuelle consiste à associer deux cylindres égaux à simple expansion, avec manivelles en quadrature. Dans les puissants moteurs à triple expansion, le grand cylindre est souvent dédoublé.

Dans le système Woolf ou ses dérivés, la vapeur, après avoir agi sur le petit piston, se rend directement au grand cylindre, par des passages aussi courts que possible. En face de ce système, s'en est placé un autre, dit *système compound*, dans lequel la vapeur échappée du petit cylindre s'écoule vers un réservoir intermédiaire où vient puiser la distribution du grand cylindre. Le système compound paraît avoir été imaginé, vers 1829, par le constructeur hollandais Roëntgen; en 1824, la maison Kœchlin formait une demande de brevet d'importation pour une machine expansive à deux cylindres indépendants et combinés, dont la description comprenait tout ce qui constitue la machine compound actuelle; E. Wolff présentait, la même année, à l'Administration anglaise une demande analogue de patente. Jusqu'en 1860, les applications furent peu nombreuses; à partir de cette époque, elles se multiplièrent, grâce à Benjamin Normand, qui eut une part prépondérante dans l'adoption définitive des machines compound pour la navigation. Par suite de l'existence du réservoir intermédiaire, les machines compound échappent à la plupart des sujétions qu'impose, dans les machines Woolf, la nécessité de ne pas accroître démesurément les espaces nuisibles. Aussi sont-elles passées du domaine de la marine dans le domaine des industries terrestres; dès 1878, on voyait le système compound largement appliqué aux machines horizontales à double expansion.

Les machines à expansion double ont deux cylindres placés parallèlement l'un à l'autre ou attelés en tandem. Dans la première disposition, elles comportent deux tiges de piston, deux bielles et deux manivelles calées soit à 90 degrés, soit à 180 degrés environ; dans la seconde, il y a unité de tige, de bielle et de manivelle. La combinaison de deux manivelles à 90 degrés régularise le moment moteur; exigeant un réservoir intermédiaire d'assez grande capacité, elle con-

vient au cas où une distance suffisante sépare ces manivelles; cette combinaison ne se prête pas à l'annulation des résultantes d'inertie sur les bâtis. Un décalage à 180 degrés permet de n'avoir qu'un petit réservoir intermédiaire et de réduire à un couple de balancement l'action de l'inertie des pièces à mouvement rectiligne sur la construction; il est approprié aux moteurs verticaux, dont les cylindres juxtaposés commandent les manivelles d'un arbre coudé. Le dispositif du tandem, fréquemment adopté pour les machines horizontales, diminue le nombre des pièces et des articulations, simplifie la distribution et se prête aux variations étendues de la puissance.

Sur les navires, les machines à triple expansion ont trois cylindres parallèles et autant de manivelles convenablement décalées. À terre, elles ne présentent le plus souvent que deux manivelles, par suite de la mise en ligne de deux cylindres. Quand le moteur a une grande puissance, on dédouble généralement le troisième cylindre, et les quatre cylindres se disposent suivant deux lignes parallèles.

Pour la quadruple expansion, les quatre cylindres sont groupés en deux files.

La proportion entre les capacités des cylindres successifs oscille autour des chiffres suivants : double expansion, 1 et 2,5 ou 3, selon que les moteurs sont à grande ou à moyenne vitesse; triple expansion, 1, 2 à 3, 4 à 7; quadruple expansion, 1, 2, 3.25, 7.

Afin de restreindre, pour un volume donné d'admission, la surface de la paroi refroidissante et spécialement la partie de cette surface correspondant au piston, qui se prête mal au réchauffage, on attribue aux cylindres une forme allongée, surtout dans les machines à moyenne vitesse. Le rapport entre la course et le diamètre du cylindre recevant la vapeur à haute pression approche parfois de 3; il est limité par le maximum susceptible d'être assigné à la vitesse du piston. Dans les moteurs verticaux, dont la hauteur ne doit pas devenir excessive, ce rapport s'écarte peu de l'unité.

En imaginant l'enveloppe de vapeur, Watt avait eu comme l'intuition de son rôle. Depuis, on a mieux apprécié la fonction de cette enveloppe, qui consiste à échauffer le cylindre, à en sécher les parois intérieures et à atténuer ainsi des condensations profondément nui-

sibles à une marche économique. La nécessité bien comprise d'avoir de la vapeur sèche, d'éviter les pertes de chaleur par conductibilité et par rayonnement, a vulgarisé l'emploi des chemises de vapeur, sans lesquelles il serait inutile de réaliser les détentes prononcées dans un seul cylindre. C'est aux moteurs à moyenne vitesse que l'enveloppe convient spécialement; pour les moteurs à grande vitesse, où l'action refroidissante des parois n'a pas le temps de développer ses effets, les constructeurs se dispensent d'appliquer un dispositif qui complique et alourdit la machine. Le réchauffage doit porter non seulement sur la paroi cylindrique, mais aussi sur le fond, qui agit immédiatement par l'intégralité de sa surface, tandis que la paroi cylindrique se découvre seulement par degrés successifs. Un intérêt réel s'attacherait au réchauffage du piston; le problème, pour lequel diverses solutions ont été indiquées, soulève de grosses difficultés pratiques. L'enveloppe peut être alimentée par la vapeur qui pénétrera ensuite dans le cylindre ou avoir une alimentation distincte, ce qui facilite le réchauffage avant la mise en marche. Dans tous les cas, l'évacuation des eaux de condensation par une pompe de purge, les renvoyant aux chaudières, ou par un purgeur automatique s'impose absolument. Quelquefois on réchauffe au moyen de faisceaux tubulaires les réservoirs intermédiaires des machines à multiple expansion.

Un autre mode de lutte contre les condensations sur les parois est l'emploi de la vapeur surchauffée, apportant avec elle un supplément de calorique. Aujourd'hui, les lubrifiants minéraux, les distributions par soupapes, les garnitures métalliques ou à base d'amiante permettent l'admission de la vapeur dans les cylindres à une température approchant de 400 degrés. Mais, eu égard aux modifications considérables que subit la température de la vapeur désaturée sous l'influence des faibles variations de chaleur, le régime des surchauffeurs manque de stabilité; la conductibilité médiocre de la vapeur constitue un obstacle à la simplicité et au bon rendement thermique du procédé; enfin il n'est pas facile d'empêcher la déperdition de la surchauffe pendant le trajet jusqu'au moteur. Dans son savant rapport au sujet de l'Exposition universelle de 1900, M. Walckenaer décrit les dispositions adoptées pour l'emploi de la vapeur surchauffée; il

mentionne des artifices intéressants quelquefois mis en œuvre, soit afin de modérer la température des parois cylindriques et d'empêcher le grippement à l'aide d'enveloppes de vapeur remplissant un rôle inverse de leur rôle ordinaire, soit afin d'abaisser un peu la température de la vapeur dans les longues admissions des machines à détente variable par la circulation partielle de cette vapeur à travers des tubes refroidisseurs, circulation que fait varier le régulateur à force centrifuge gouvernant le mécanisme de distribution. À peine y a-t-il lieu d'ajouter que, pour les moteurs à multiple expansion, le premier cylindre exige seul des précautions spéciales.

Pendant la double course du piston, le cycle des actions de la vapeur sur chacune de ses faces comprend six périodes : admission, détente, avance à l'échappement, échappement, compression, avance à l'admission. Une fois la durée de ces six périodes fixée, la distribution doit assurer la répartition ainsi établie. Toute distribution comprend trois organes ou groupes d'organes : les lumières, qui livrent passage à la vapeur; les obturateurs ou distributeurs, mettant ces lumières en communication avec l'admission ou avec l'échappement; la transmission, à l'aide de laquelle le mouvement, pris sur un des organes de la machine, est imprimé aux obturateurs.

Tantôt les lumières d'admission sont distinctes des lumières d'échappement, et le cylindre présente quatre orifices munis chacun d'un obturateur spécial; ce dispositif simplifie le rôle de chaque organe et permet de le choisir, de le placer, de le gouverner au mieux de sa fonction; il est très fréquemment employé pour les machines puissantes à moyenne vitesse (Corliss, Sulzer, etc.). Tantôt le cylindre ne comporte que deux lumières, qui servent successivement à l'admission et à l'échappement; ce système a l'avantage de la simplicité, mais tend à exagérer les condensations à l'admission. Quelquefois, les deux lumières, très courtes, sont desservies soit par un distributeur aussi long que le cylindre, soit par deux obturateurs distincts. Dans beaucoup de machines, elles s'allongent, se recourbent et rapprochent leurs orifices, de manière à n'exiger qu'un distributeur unique, de petites dimensions; les espaces nuisibles s'exagèrent alors démesurément.

On distingue deux catégories d'obturateurs : les obturateurs glissants, se déplaçant en général sur une glace polie dans laquelle s'ouvre l'orifice; les obturateurs levants, dont le mouvement est perpendiculaire à l'orifice.

Parmi les obturateurs glissants se range d'abord l'ancien tiroir plan à coquille, simple de construction, robuste, durable, donnant une excellente étanchéité. Mais, lorsque la surface du tiroir devient considérable, il subit, avec les grandes vitesses actuelles et sous des pressions un peu fortes, des efforts qui provoquent de l'usure, exposent à des grippements. Un remède consiste à réduire la course en attribuant aux lumières la forme d'un rectangle très étroit dans le sens du mouvement ou en fractionnant les orifices et en employant un tiroir à jalousie, dit aussi tiroir à grille. Il existe d'autres moyens de diminuer l'effort, par exemple l'usage des tiroirs compensés ou équilibrés. Ces expédients ont fait place à un dispositif permettant l'utilisation de la vapeur à haute température; la glace plane est remplacée par un cylindre et l'obturateur se transforme en un piston léger, bien équilibré, n'ayant à surmonter que les frottements causés par la tendance à l'extension des bagues de garniture. Les tiroirs simples ne peuvent réaliser les courtes admissions, sans exagérer les compressions et sans laminier fortement la vapeur à l'introduction; cet inconvénient disparaît avec la superposition de deux tiroirs, dont l'un produit l'admission et l'échappement dans les conditions ordinaires, tandis que l'autre coupe l'arrivée de vapeur avant la fin de l'admission naturelle et prolonge la période de détente (Saulnier, 1834; Meyer, 1842-1843; Farcot; etc.); un deuxième excentrique est alors indispensable pour la conduite du tiroir de détente. Dans le système des tiroirs superposés, le degré d'introduction se met aisément sous la dépendance du régulateur. Farcot a, l'un des premiers, rendu pratique la détente variable par le régulateur; antérieurement, le régulateur agissait sur le papillon, c'est-à-dire que la variation de puissance motrice pendant la marche résultait d'un étranglement de la vapeur, procédé nuisible au rendement.

Reprenant une disposition proposée par Denis Papin, puis appliquée par Maudslay à un grand nombre de bons et puissants appareils,

Georges Corliss a fait usage de distributeurs coniques, analogues aux clefs des robinets à boisseau et animés d'un mouvement d'oscillation autour de l'axe du cône; beaucoup de constructeurs ont suivi la même voie. Au mouvement d'oscillation peut être substitué un mouvement de rotation continue; la distribution par robinets tournants offre une régularité et une douceur remarquables; un manchon intérieur qui joue le rôle du tiroir de détente et dont le régulateur élève ou abaisse la suspension fait, au besoin, varier l'admission. L'ouverture de l'angle du cône fournit, comme limite, le distributeur plan tournant.

Le type des obturateurs levants est la soupape connue sous le nom de soupape équilibrée, soupape à double siège ou soupape de Cornouailles, dont l'invention serait due à Hornblower. Ce distributeur n'oppose qu'une faible résistance au mouvement et ouvre avec une faible levée de larges débouchés à la vapeur; sa commande se fait par une transmission légère. Grâce aux perfectionnements qu'y ont apportés MM. Sulzer, son usage a pris une grande extension en Europe. Dans son rapport général sur l'Exposition de 1900, M. Michel Lévy signale un dispositif préconisé par la Société Weyher et Richemond : la soupape est remplacée par un obturateur en acier affectant la forme d'un cuir embouti (\sqcap renversé) et présentant l'élasticité d'un segment de piston; cet obturateur joue dans une partie fixe tronconique et se soulève sous l'action d'un tampon meneur; il paraît convenir notamment à une marche très rapide.

Une extrême diversité existe dans les transmissions qui communiquent le mouvement aux distributeurs. Mais la plupart se rattachent à l'une ou l'autre des deux catégories suivantes : transmissions à liaison complète; transmissions à déclenchement.

Les transmissions à liaison complète sont opérées par des organes rigides. Souvent, elles se composent d'une manivelle tournant avec l'arbre de couche, d'une bielle et d'une tige guidée; la manivelle prend dans un grand nombre de cas la forme d'un excentrique circulaire, et la grosse tête de bielle est alors remplacée par un collier d'excentrique. Ce système agissant sur un tiroir en coquille constitue le type le plus répandu; simple, robuste, il s'adapte à toutes les allures. Au lieu de prendre le mouvement sur l'arbre de couche, on

peut l'emprunter à la bielle reliant le piston et la manivelle, sauf intercalation de leviers intermédiaires (Joy, Marshall et autres).

Ces distributions impriment au tiroir un mouvement sinusoïdal ; elles placent d'ailleurs l'admission et l'échappement sous une étroite dépendance réciproque. Aussi conviennent-elles mal aux détentes prolongées. La coulisse de Stephenson permet de donner plus d'étendue à la détente, mais ne fournit qu'une solution incomplète. Si, au lieu d'attaquer directement le tiroir par la bielle d'excentrique, on attache la petite tête de cette bielle à un levier articulé sur la tige du piston et sur celle du tiroir, le mouvement sinusoïdal se trouve considérablement modifié ; il est possible d'arriver ainsi à des combinaisons heureuses (Walschaerts, Heusinger de Waldegg).

Quand le distributeur d'admission et le distributeur d'échappement sont rendus indépendants comme dans les machines à quatre lumières, la plus grosse difficulté disparaît. Tandis que, dans la plupart des transmissions à mouvement alternatif, les choses sont disposées de telle sorte que, si l'un des points du système a un mouvement sinusoïdal, les autres points aient des mouvements du même genre, Corliss a su réaliser des rapports très variables entre les vitesses des diverses pièces oscillantes, laisser le distributeur presque immobile pendant les périodes d'ouverture ou de fermeture de l'orifice, le mouvoir très rapidement lorsque cet orifice n'est qu'en partie découvert, réduire au minimum les étranglements de vapeur. L'application de ce système aux quatre distributeurs des machines Corliss se complète par l'intercalation, sur la commande des distributeurs d'admission, d'un déclenchement qui en accélère encore la fermeture ; nous y reviendrons plus loin. Avec les quatre distributeurs distincts et les transmissions susceptibles d'être réglées séparément, tous les obstacles aux grandes détentes s'évanouissent.

La longue immobilité qu'exigent les distributeurs levants rend leur emploi peu compatible avec le mouvement continu des transmissions à liaison complète.

Seules, ces transmissions sont appropriées aux machines rapides. Elles ont donné naissance à de nombreuses et ingénieuses combinaisons cinématiques, au sujet desquelles il m'est impossible d'insister

ici, mais dont on trouve des exemples scrupuleusement décrits dans le rapport précité de M. Walckenaer.

Il peut être avantageux de donner au distributeur un mouvement saccadé : deux temps d'arrêt pour la fermeture et l'ouverture complètes de la lumière; dans l'intervalle, un déplacement rapide. La transmission par déclenchement fournit, à cet égard, une solution justement appréciée. En voici le principe : un distributeur d'admission, par exemple, est placé sous l'action permanente d'une force extérieure, le plus souvent d'un ressort, qui tend à le ramener vers la position de fermeture; il reçoit son mouvement d'un organe de la machine par une transmission coupée en deux parties, dont une clenche, d'un déplacement facile, rétablit la continuité; si, par contact avec un butoir fixe, la clenche vient à sauter, le distributeur revient brusquement à la position de fermeture; une sorte de frein à air ou à liquide modère ce retour. Newcomen avait déjà employé le déclenchement au début du XVIII^e siècle. L'idée fut reprise par beaucoup d'ingénieurs, Bourdon du Creusot, Sickles (1841), etc. Vers 1849, Corliss compléta le dispositif en gouvernant la détente au moyen du régulateur à force centrifuge. Lors de l'Exposition universelle de 1867, Corliss et les frères Sulzer montrèrent deux admirables machines, ayant comme trait commun la transmission par déclenchement au distributeur, avec détente variable par le régulateur.

Dans ces machines, de même que dans les autres dérivant des premiers types, le déclenchement n'était appliqué qu'à la fermeture de l'admission au commencement de la détente. L'ouverture de l'admission, ainsi que l'ouverture et la fermeture de l'échappement, ayant lieu quand le piston est en fin de course et a perdu sa vitesse, ne demandent pas autant de rapidité et peuvent se faire par une transmission à liaison complète. Aujourd'hui encore, la commande à déclenchement a, sauf exception, son rôle limité au commencement de la détente; elle constitue pour ainsi dire une combinaison superposée au mécanisme à liaison complète.

L'imagination s'est exercée sur le déclenchement, en a varié le dispositif et les applications. Objet d'une légitime faveur, les distributions par déclenchement entraînent des complications mécaniques

que ne compense peut-être pas toujours la meilleure utilisation de la vapeur. Un de leurs mérites est de faciliter la commande de la détente variable par le régulateur. Elles s'adaptent mal aux allures rapides : la fermeture par ressort devient alors trop lente.

Diverses transmissions méritent aussi d'être citées. Telle la transmission par contact ou à repos, dans laquelle la tige du tiroir, au lieu d'être fixée à cet organe, le traverse librement et porte des butoirs, qui lui impriment un mouvement composé de deux arrêts aux extrémités de la course et d'un déplacement sinusoïdal dans l'intervalle (machines Farcot, machines Sulzer, pompes sans arbre tournant, etc.). M. Michel Lévy mentionne, pour une machine marine du Creusot, la commande du tiroir par un cylindre hydraulique à double effet, reproduisant le va-et-vient d'un autre cylindre dont un excentrique à calage et rayon variables actionne le piston ; ce dispositif est dû à M. Bonjour. Les cames, excentriques triangulaires, excentriques à ondes, et, en général, les profils découpés, autrefois fort employés pour la conduite des tiroirs, ont perdu leur ancienne vogue ; ils ne s'accommodaient pas des allures rapides.

Les variations de la puissance développée s'obtiennent, soit en étranglant plus ou moins la conduite de vapeur à l'aide d'obturateurs équilibrés, soit en changeant le degré de la détente, opération qui doit généralement s'effectuer sans arrêt. Parfois, des machines à vapeur auxiliaires servent à déplacer les organes de distribution. Le problème devient particulièrement difficile lorsqu'il s'agit de modifier automatiquement la détente par le régulateur, dont la puissance est toujours faible. Avec les transmissions par déclenchement et les transmissions à repos, le mouvement de certains organes offre des temps d'arrêt, pendant lesquels le régulateur peut agir et prendre sa position d'équilibre. Quoique se prêtant moins à la commande par le régulateur, les transmissions à liaison complète n'y sont cependant pas inaptes ; l'essentiel est que le système soit dessiné et construit de manière à n'exercer aucune réaction sensible sur le manchon du régulateur. Les distributeurs superposés permettent la modification facile de la détente (distribution Farcot, distribution Meyer, distribution par obturation de l'arrivée de vapeur).

Il est souvent nécessaire que la machine puisse à volonté marcher en avant ou en arrière. Un procédé fort simple de changement consiste à intervertir les communications de vapeur; ce procédé n'a évidemment d'application possible que pour les moteurs sans détente ou à très faible détente. On agit presque toujours sur la commande des distributeurs. Si le mouvement est pris sur l'arbre de couche à l'aide d'un excentrique, le décalage de cet excentrique suffit. Jadis, un moyen usuel, mais inconciliable avec l'emploi de la contre-vapeur, était de rendre l'excentrique fou sur l'arbre et de l'entraîner par des tocs; la manœuvre s'effectuait à l'arrêt. Quelques constructeurs modifiaient la position du centre d'excentricité au moyen d'un coulisseau jouant dans une rainure de l'excentrique. Actuellement, le système usuel est celui des deux excentriques et de la coulisse (William de Newcastle, 1842; Howe et Stephenson, 1843; Gooch, 1843; etc.); comme l'excentrique à rainure, la coulisse permet les modifications de la détente; mais, dans les deux combinaisons, des avances et des compressions fort étendues accompagnent les détentes prolongées. Les transmissions à liaison complète, prenant le mouvement sur la bielle ou sur la manivelle, s'adaptent aussi au renversement de la marche par l'interposition d'une coulisse oscillant autour de son point médian; il en est de même pour la transmission Walschaerts. Comme les transmissions à liaison complète, les transmissions à repos ou par déclenchement sont susceptibles d'être transformées en vue du changement de marche.

Une progression analogue à celle des pressions s'est produite dans les vitesses de marche. L'exemple des locomotives et celui des machines marines à hélices ont démontré que l'accroissement de la vitesse n'entraînait nullement une diminution de l'effet utile. D'autre part, il y avait manifestement avantage à tourner vite pour réduire le poids et l'encombrement du moteur, pour atténuer les actions de paroi, pour rendre plus prompte l'action du régulateur. Les électriciens ont poussé à l'accélération, afin d'accoupler directement sur l'arbre à manivelles la partie tournante de la machine électrique et d'en restreindre les dimensions.

À l'Exposition universelle de 1900, aucune machine n'était établie en vue d'une vitesse angulaire inférieure à 70 tours; les grands moteurs de 300 à 3,000 chevaux avaient, pour la plupart, une vitesse de rotation comprise entre 70 et 125 tours, avec une vitesse moyenne du piston de 2 m. 50 à 4 m. 20 (3 m. 50 à peu près dans beaucoup de cas). Aujourd'hui, les moteurs faisant de 70 à 150 tours sont des moteurs à moyenne vitesse, admettant tous les modes de transmission, même le déclenchement. Le nombre de tours des machines à grande vitesse va de 150 à 500 ou davantage, pour les petites unités; il est souvent voisin de 200 ou 250.

Grâce à la connaissance plus approfondie du fonctionnement des machines, aux conquêtes de la métallurgie, au progrès de l'outillage des ateliers, les constructeurs ont pu accroître les vitesses, sans compromettre ni la douceur de la rotation, ni la stabilité de l'assise. Les forces centrifuges des pièces tournantes peuvent être exactement équilibrées; il faut à ces pièces des arbres et des paliers fortement établis, des coussinets d'une large surface et d'un ajustement parfait, une lubrification abondante. On sait que les forces d'inertie des pièces animées d'un mouvement alternatif tendent à produire des chocs sur les articulations, des trépidations et des oscillations dans le bâti. Les principales dispositions prises afin de les combattre sont les suivantes : alléger autant que possible les pistons, les crosses, les bielles; régler la distribution de vapeur de manière à assurer une transformation graduelle des forces sur le pied de bielle; soigner l'ajustage des articulations et le guidage des patins de glissière; opposer les actions sur le bâti et les équilibrer partiellement ou les orienter dans le sens de la résistance maximum des fondations.

En même temps qu'augmentaient les vitesses, le graissage devait être perfectionné.

Le graissage intérieur se fait exclusivement à l'huile minérale et se réduit au minimum. Un procédé usuel est l'injection dans le courant de vapeur à l'amont du cylindre par une pompe ou un appareil équivalent. On peut séparer l'huile de la vapeur d'échappement en recourant à l'action de la force centrifuge ou à l'égouttage.

Pour le graissage extérieur, l'emploi de l'huile minérale est très répandu. Tous les points d'alimentation sont desservis par des réservoirs supérieurs, avec tubes indicateurs de niveau; des robinets à pointeau règlent le débit des conduits adducteurs; au besoin, un compte-gouttes sert à contrôler l'écoulement. Entre autres dispositifs, citons les bagues ou chaînettes roulantes relevant l'huile d'une façon continue dans les paliers, les conduits utilisant la force centrifuge pour le graissage des tourillons de manivelle et des soies de vilebrequins d'arbres coudés, les lécheuses des articulations à mouvement rectiligne alternatif prenant l'huile sur des pinceaux et permettant la fixité des points d'alimentation. L'huile en excès est reprise à la partie inférieure, filtrée et réutilisée; une disposition fréquente consiste à la conduire par une pompe vers un épurateur, d'où elle retourne aux réservoirs. Ceux-ci peuvent être sous pression; la réunion des deux services du graissage intérieur et du graissage extérieur est ainsi facilitée.

Souvent les machines à grande vitesse reçoivent un bâti enveloppant; la base de ce bâti contient un bain d'huile qui graisse les paliers et où barbotent les têtes de bielle.

Le graissage intensif des articulations et des glissières peut aussi s'effectuer sous pression, au moyen d'une pompe oscillante sans clapets et d'un accumulateur à pression constante, suivant le système créé par M. Delaunay-Belleville.

Des godets remplis d'une graisse consistante et pourvus, le cas échéant, d'un mécanisme de refoulement progressif suffisent aux articulations secondaires.

En 1878, sauf quelques moteurs de faible puissance destinés à des usages spéciaux, les variétés de machines à vapeur gravitaient encore autour des deux types à balancier et à connexion directe. La machine à balancier se présentait comme grande machine fixe de manufacture, avec cylindre vertical au-dessous du balancier. Dans la machine à connexion directe, le cylindre était ordinairement horizontal, quelquefois vertical et superposé à l'arbre, sous la forme dite à *pilon*.

À l'Exposition de 1889, les visiteurs ne pouvaient qu'être frappés de l'abandon relatif du type à balancier, auquel sa marche sûre et régu-

lière avait pendant si longtemps assuré la prépondérance dans les grandes manufactures. Grâce à ses avantages de simplicité, la machine horizontale à cylindre unique continuait à être fréquemment employée comme moteur de puissance moyenne. Mais la machine compound horizontale à deux cylindres attaquant deux manivelles à angle droit calées aux extrémités d'un arbre unique, avec distribution de vapeur par mécanismes à déclic, semblait être le type favori du grand moteur d'atelier.

Vers 1900, le balancier a été complètement délaissé. Les machines sont horizontales ou verticales; elles appartiennent, dans ce dernier cas, au type pilon. Quand la place ne fait pas défaut, on préfère généralement, pour les grands moteurs à moyenne vitesse, la disposition horizontale, qui favorise la stabilité, simplifie le mécanisme de certaines distributions, rend plus faciles le service et la surveillance; l'action de la pesanteur sur les pistons exige des précautions spéciales pour empêcher l'usure des cylindres, pour assurer la résistance des tiges, pour prévenir les frottements excessifs des presse-étoupes; ces précautions varient selon que le piston est traînant ou flottant. La disposition verticale économise la place, simplifie le guidage des pistons, allège ces organes, rend généralement inutiles les contre-tiges; en revanche, elle est défavorable à la stabilité, diminue la simplicité de quelques distributions, complique le service des machines de grandes dimensions, qui nécessitent alors des passerelles et des escaliers; les moteurs à grande vitesse présentant des formes compactes et pourvus le plus souvent d'une distribution par tiroir sont presque toujours du type vertical, qui en réduit l'encombrement au minimum.

Dans la catégorie des machines horizontales à moyenne vitesse, les moteurs à cylindre unique, avec bâti à baïonnette et distribution du genre Corliss, ont, en raison de leur simplicité, de leur souplesse, de la facilité de leur service, conservé des adeptes fidèles parmi les constructeurs français de premier ordre, même pour des puissances voisines d'un millier de chevaux. Ces constructeurs font aussi, mais moins fréquemment, des machines monocylindriques verticales.

Les machines à deux cylindres en tandem, pour vitesse moyenne, sont horizontales. Elles n'ont qu'une manivelle et une bielle, réduisent

les liaisons nécessaires pour équilibrer les réactions, admettent un simple bâti à baïonnette avec entretoisement solide des deux cylindres, offrent souvent plus de commodité que les machines à deux cylindres parallèles au point de vue de l'encombrement, n'appellent pas une distribution beaucoup plus compliquée que les moteurs monocylindriques, donnent toute liberté pour les changements du degré d'admission au petit cylindre. L'infériorité du système sur celui des deux cylindres parallèles et des deux manivelles décalées de 90 degrés est de ne pas atténuer les variations du moment moteur dans le tour et de ne pas se prêter au démarrage dans toutes les positions. Aujourd'hui, la pratique dominante consiste à mettre le petit cylindre derrière le grand.

Quand les deux cylindres des moteurs à moyenne vitesse sont disposés parallèlement, la machine peut être horizontale ou verticale. Dans les moteurs horizontaux, les paliers de manivelle et les plaques d'appui des cylindres se placent sur deux massifs, parfois assez écartés l'un de l'autre; les manivelles, habituellement calées à 90 degrés, occupent les extrémités de l'arbre moteur, sur la partie centrale duquel on monte le volant et la poulie motrice ou la partie tournante du système électrique, s'il s'agit d'un groupe électrogène. Pour les machines verticales, il y a deux modes d'installation : l'un, juxtaposant les cylindres au-dessus d'un arbre à deux vilebrequins, leur donnant un massif commun de fondation, plaçant sur les prolongements de l'arbre le volant et la poulie motrice; l'autre, imitant le type horizontal à manivelles croisées.

Des machines à triple expansion et vitesse moyenne, comportant trois ou quatre cylindres, figuraient à l'Exposition de 1900. Ces machines étaient horizontales ou verticales. Les cylindres se trouvaient soit juxtaposés, soit répartis en deux tandems ou en un tandem et un cylindre isolé.

Pour les vitesses dépassant 150 tours par minute, l'Exposition montrait des machines monocylindriques verticales ou horizontales, des machines compound à double expansion avec cylindres horizontaux ou verticaux en tandem, des machines à double expansion verticales avec cylindres parallèles, des machines à triple expansion avec trois

ou quatre cylindres juxtaposés ou répartis comme pour la moyenne vitesse, des machines à quadruple expansion verticales avec quatre cylindres groupés en deux tandems ou exceptionnellement avec deux cylindres.

Dans le cas où la vitesse de rotation s'accroît à un tel point que les chocs consécutifs aux renversements des efforts de bielles deviennent dangereux, l'emploi des machines à simple effet permet d'éviter ces renversements. Ces machines, destinées à la commande directe d'outils, ne sont pas nouvelles; dès 1878, Brotherhood exposait son célèbre moteur à trois cylindres convergeant vers un même arbre, attaquant un vilebrequin unique et pouvant fonctionner à des vitesses de 1,500 tours ou davantage. D'autres types, ne réalisant d'ailleurs qu'une vitesse notablement moindre, ont paru aux Expositions de 1878, 1889 et 1900. Les effets de l'inertie prennent alors une intensité exceptionnelle et doivent fréquemment être combattus par des forces auxiliaires (pesanteur, vapeur, matelas d'air, etc.).

La machine à vapeur a développé sa régularité de marche. Ce progrès s'est surtout accentué vers la fin du siècle, par suite des exigences propres à la conduite des dynamos. Le service des machines dynamo-électriques n'admet que des variations minimales de la vitesse durant un tour, et la vitesse moyenne doit pouvoir être maintenue constante, quelle que soit la résistance.

On emploie conjointement à la régularisation du mouvement le volant et le régulateur.

Le volant contient dans d'étroites limites les écarts de vitesse dus aux changements périodiques du couple moteur et, s'il y a lieu, à ceux du couple résistant. Son rôle est aussi de ralentir assez l'accélération moyenne pour permettre l'intervention du régulateur, lorsque l'un ou l'autre couple subit une variation plus durable. Seule employée jadis, la fonte de fer continue à l'être fréquemment; l'acier moulé a une supériorité incontestable; les tôles de fer assemblées, les jantes frettées de fils d'acier, etc., rendraient aussi d'excellents services.

Quant au régulateur, sa mission est de maintenir la vitesse malgré les variations prolongées du travail résistant, par la modification auto-

matique de la pression initiale sous laquelle agit la vapeur ou plutôt du degré d'introduction. Le prototype des régulateurs est le pendule conique ou régulateur à force centrifuge de Watt, emprunté par l'illustre ingénieur à l'industrie de la meunerie. Cet appareil, commandant la valve d'admission de la vapeur, fut longtemps considéré comme répondant à tous les besoins. Pourtant ses imperfections apparurent au fur et à mesure qu'augmentait la puissance des machines, que leur marche s'accélérait, qu'elles desservaient davantage des industries exigeant une invariabilité presque mathématique de la vitesse, par exemple celle de la filature et plus tard celle de l'éclairage électrique. De nombreux savants ou praticiens s'ingénierent à le perfectionner : tels Farcot, Foucault, Porter, Rolland, etc. En même temps, on comprenait que la fonction uniformisatrice ne se concentre pas exclusivement dans le régulateur, mais dépend aussi d'autres organes, notamment de ceux qui lui transmettent le mouvement de l'arbre de couche et de ceux par lesquels il commande à son tour l'admission. Aujourd'hui, le vieux régulateur de Watt, judicieusement employé, procure une régularité huit ou dix fois plus grande qu'à l'origine.

Tout en gardant pour les machines à allure modérée le système des masses pesantes tournant autour d'un axe vertical, on remplaça l'ancien pendule à bras libres par un pendule avec surcharge, animé d'une plus grande vitesse, ayant une action plus énergique et surtout moins encombrant. La surcharge fut tantôt fixe et axiale (Porter), tantôt portée par un levier à bras variable, ce qui permettait de modifier l'allure du moteur; quelquefois, l'action de ressorts en lames ou en hélice s'ajoutait à celle de la pesanteur. Il y eut des régulateurs plus ou moins isochrones, à bras croisés (Farcot) ou à contrepoids monté sur un bras vertical (Foucault): l'isochronisme absolu, qui supposait l'écartement complet des boules au moindre changement dans la vitesse de régime, était irréalisable, car il imprimait fatalement à la machine une allure déréglée; des dispositifs durent même être imaginés afin de prévenir l'excessive sensibilité du régulateur, et de ces recherches naquit le frein liquide ou gazeux interposé sur le parcours de la transmission.

Pour les machines à rotation rapide, le régulateur a été monté

directement sur l'arbre de couche et fait de deux masses pesantes que portent des bras articulés; la tendance de ces masses à s'écarter de l'arbre sous l'action de la force centrifuge est contre-balancée par des ressorts. L'appareil prend ordinairement place à l'intérieur du volant, dont la jante lui sert d'enveloppe protectrice.

À côté des régulateurs mettant en jeu la force centrifuge se sont créés des régulateurs d'inertie, pendules à trajectoire plane dont les oscillations ont une amplitude dépendant de la vitesse et qui rencontrent ou échappent des embrayages. Le dispositif comporte d'ailleurs de nombreuses variantes. On peut très simplement associer la force centrifuge et l'accélération tangentielle, en faisant porter les boules par un bras perpendiculaire à l'axe de rotation et mobile autour d'une charnière excentrée; la trajectoire de la boule est ainsi oblique sur le rayon et sur la tangente.

Souvent, dans les usines électriques, la force électromotrice maintenue constante aux bornes de la dynamo a été utilisée pour la régulation de l'allure des moteurs.

Divers régulateurs fondés sur l'inertie des fluides en mouvement ont eu peu de succès. Ils manquaient ordinairement de précision dans leurs effets.

Le mécanisme à déplacer étant parfois fort lourd, on a songé à prendre le travail nécessaire sur l'arbre moteur au moyen d'une transmission embrayée ou débrayée par le régulateur. Cette disposition, généralement abandonnée, est devenue l'origine du très intéressant compensateur Denis et d'appareils analogues. Une solution complète a été fournie par les servo-moteurs, employés comme transmission entre le régulateur et le modificateur de la puissance.

Quand la machine est à expansion multiple, le régulateur agit soit uniquement sur le cylindre à haute pression, soit sur plusieurs cylindres.

Ordinairement, les régulateurs sont complétés par un dispositif de réglage à la main, pour la correction de la vitesse angulaire moyenne.

Je me borne à mentionner les modérateurs de vitesse, qui, au lieu de ralentir le mouvement par une réduction du travail moteur, opè-

rent par la création de résistances passives et dont l'usage reste limité (modérateurs à ailettes, freins, etc.).

Les condenseurs le plus communément employés sont toujours, sauf dans la marine, les condenseurs par mélange. Suivant les cas, l'afflux de l'eau réfrigérante se fait, soit en nappe, soit en pluie au travers d'une crépine allongée, horizontale ou verticale. En général, une même pompe extrait l'eau et l'air à la base du condenseur; le piston de cette pompe a reçu des vitesses de plus en plus fortes. Il existe un autre système de condensation méthodique par mélange, dans lequel, après avoir fait cheminer en sens inverse l'eau réfrigérante et la vapeur à condenser, on enlève l'air au moyen d'une pompe à vide couronnant le condenseur, tandis qu'on assure à la base l'élimination de l'eau.

Quelquefois, les éjecto-condenseurs se substituent aux condenseurs par mélange et à leurs pompes. Ces appareils, qui agissent plus ou moins à la manière de l'injecteur Giffard et dont le plus ancien modèle paraît être celui de Morton, n'occupent que peu de place et n'exigent aucune transmission de mouvement, mais consomment ordinairement beaucoup d'eau. Une tuyère centrale amène l'eau réfrigérante en un jet qui, après l'amorçage, emprunte sa force vive à l'excès de la pression atmosphérique sur la pression intérieure; des buses concentriques lancent la vapeur d'échappement au contact de ce jet pour le condenser; la sortie a lieu par un divergent, où la pression augmente progressivement aux dépens de la vitesse et arrive à dépasser légèrement la pression atmosphérique. Des dispositions imaginées par M. Ch. Bourdon permettent de réduire la dépense d'eau.

Proposés par Hall dès 1830, les condenseurs par surface s'appliquent spécialement aux machines marines; leur usage sur terre est très restreint. Ils opèrent la condensation, sans mélange de la vapeur condensée à l'eau réfrigérante. Celle-ci circule généralement dans des tubes réunis en faisceau, et la vapeur se condense en léchant la surface extérieure de ces tubes; parfois, on adopte la disposition inverse; les tubes peuvent être remplacés par des plaques creuses ondulées. Les condenseurs par surface sont plus coûteux d'installation et d'entretien

que les condenseurs par mélange; ils nécessitent une quantité supérieure d'eau de réfrigération. Aussi leur emploi à terre est-il limité à des cas où on dispose d'eaux abondantes, mais où ces eaux sont impropres à l'alimentation des chaudières, difficiles à épurer, et où la condensation sans mélange fournit dès lors avantageusement l'eau alimentaire. Un expédient pour économiser l'eau réfrigérante consiste à refroidir par l'air l'eau chaude provenant du condenseur, puis à la réutiliser.

Une variante de la condensation par surface est l'aéro-condensation, basée sur l'emploi exclusif de l'air atmosphérique comme fluide refroidisseur. Les aéro-condenseurs comportent des tubes ou des plaques creuses ondulées, qui livrent passage à la vapeur et sont soumis à une ventilation extérieure.

Quel que soit le système de condensation par surface, l'eau extraite du condenseur au moyen de la pompe à air doit être soigneusement dégraissée.

Maintenant, tous les bons constructeurs multiplient leurs efforts pour approcher de la perfection technique. Ils mettent en œuvre des matériaux de la meilleure qualité, leur font subir des épreuves sévères, affectent à chaque pièce le métal le plus approprié : c'est ainsi que les arbres, bielles, tiges de piston sont établis en acier forgé et recuit, les pièces fondues en fonte de choix ou moulages d'acier, les coussinets en fonte recouverte de métal anti-friction, etc. Une entente plus complète des formes à assigner aux organes et des conditions de leur résistance préside aux études d'ensemble et de détail. Des machines-outils de haute précision et de grande puissance servent à l'usinage des pièces de forge, à l'alésage des cylindres et des glissières. Le finissage dispose de calibres et de mandrins en acier trempé, permettant l'approximation au centième de millimètre. Cette rigueur de construction n'est plus l'apanage d'un petit nombre d'ateliers. Entre autres avantages, elle a celui d'assurer l'interchangeabilité des pièces. Les emmanchements s'effectuent à la presse hydraulique, sous des pressions considérables. De scrupuleuses vérifications accompagnent l'ajustage et le montage, facilités d'ailleurs par le soin et l'exactitude de la fabrication.

On reconnaît utile de forer les arbres suivant l'axe, afin de diminuer leur poids à résistance égale et de réduire par suite le travail de frottement dans les paliers. Les manivelles sont équilibrées ou remplacées par des plateaux. Parfois, une circulation d'eau active le rafraîchissement des paliers. Habituellement, les garnitures de pistons se composent de bagues en fonte, fendues et quelquefois revêtues d'antifriction. L'ancien presse-étoupe fait place à des garnitures réfractaires, ayant souvent pour base l'amiante, ou à des garnitures métalliques en alliages tendres.

Pour les grandes machines horizontales avec manivelle en porte à faux, le bâti usuel est le bâti à baïonnette; on choisit le sens de la rotation de manière à faire travailler principalement la glissière inférieure. Un autre dispositif appliqué aux mêmes machines présente une base plate, par laquelle la glissière repose dans toute sa longueur sur le massif de fondation. Le bâti des machines verticales comporte, au-dessus d'une plaque de base très rigide, un jambage oblique en forme de poutre creuse, portant une glissière verticale et recevant le cylindre à son sommet par des boulons; parfois, il existe deux jambages de ce genre disposés en face l'un de l'autre. Dans les machines verticales de grandes dimensions, on allège le système par la substitution de deux colonnes d'acier, verticales ou obliques, au jambage d'avant. Comme nous l'avons vu précédemment, le bâti de certains moteurs à grande vitesse devient enveloppant et forme une boîte où les têtes de bielle barbotent dans un bain d'huile.

Les constructeurs abordent, sans crainte, la construction d'unités aussi puissantes que le réclament les applications. Ce sont surtout les progrès de l'électricité qui ont précipité le mouvement : au point de vue électrique comme au point de vue mécanique, il y avait un intérêt manifeste à réduire le nombre et à élever la puissance des unités génératrices, pour abaisser le prix de revient du kilowatt-heure. Vers 1889, une machine de 1,000 chevaux était encore exceptionnelle; actuellement, elle constitue une unité courante; la puissance des moteurs appartenant aux groupes électrogènes de l'Exposition de 1900 allait à 2,500 et 3,000 chevaux.

À la vérité, la marine a des unités d'une puissance très supérieure. Mais les moteurs d'usine sont soumis à des conditions économiques, qui empêchent la question de se poser dans les mêmes termes pour les deux catégories de machines.

Il y a un demi-siècle, les phénomènes dynamiques et thermiques dont la machine à vapeur est le siège étaient fort peu connus. Pour calculer la dépense probable de vapeur dans une machine, les constructeurs ne se préoccupaient que de la pression et du volume occupé à la fin de l'admission. Le problème de l'augmentation du travail fourni par la vapeur se posait dans les termes suivants : prolonger la période de détente, éviter avec soin les étirages de vapeur, réduire autant que possible les espaces nuisibles. Cependant les faits même grossièrement observés dans les ateliers avaient établi que la dépense effective de vapeur dépassait de 40 p. 100, 60 p. 100 et davantage la dépense calculée; que la détente, poussée au delà de certaines limites, cessait d'être économique et pouvait entraîner une consommation supérieure à celle du travail sans détente; qu'on attribuait une influence exagérée aux étirages de vapeur et aux espaces nuisibles. L'efficacité des enveloppes de vapeur, dont, par une intuition de génie, James Watt avait entouré ses cylindres, restait sans explication satisfaisante. Il en était de même pour la supériorité de la détente par échelons sur la détente dans un seul cylindre au point de vue de la dépense de combustible. Les conditions de fonctionnement des machines à vapeur dépendaient manifestement de phénomènes jusqu'alors négligés, à peine entrevus par des esprits éminents comme l'ingénieur Combes (1843) et l'amiral Pâris, et jouant un rôle capital.

Hirn et ses collaborateurs eurent le grand mérite de jeter une vive lumière sur ces phénomènes, par des expériences admirables entreprises et poursuivies sous les auspices de la Société industrielle de Mulhouse. Pour la première fois, les puissants appareils de l'industrie subissaient l'expérimentation rigoureuse et précise des laboratoires de physique. Hirn s'était proposé : d'une part, de mesurer le travail développé par une machine à vapeur et de définir les circonstances dans lesquelles se produisait ce travail; d'autre part, de supputer exacte-

ment ce que devenait la chaleur apportée par la vapeur. Si le procédé classique des diagrammes d'indicateur répondait à la première partie du problème, les mesures de chaleur exigeaient la création d'instruments et de méthodes calorimétriques. Tout d'abord, l'illustre physicien constata la disparition d'une quantité de chaleur équivalant au travail développé sur le piston; c'était la vérification éclatante, la consécration du principe fondamental de la thermodynamique. En outre, il montra péremptoirement les échanges incessants de chaleur entre la vapeur et les parois qui l'enferment ou tout au moins la couche d'humidité qui couvre ces parois : au moment de l'introduction, un poids important de vapeur, non sensible à l'indicateur de Watt, se condense sur les parois du cylindre et du piston; à l'échappement, cette vapeur va, pour une large part, au condenseur, sans avoir fourni de travail utile, et la perte ainsi éprouvée excède de beaucoup celle des étirages ou des espaces nuisibles. La théorie nouvelle rendait clairement compte des avantages dus aux enveloppes de vapeur. Elle donnait aussi une explication satisfaisante de l'économie réalisée au moyen de la détente par échelons : le petit cylindre, où se fait directement l'admission, ne communique jamais avec le condenseur; par suite, les condensations et vaporisations successives ont beaucoup moins d'importance que dans le cylindre unique des machines ordinaires. En même temps qu'il dégagait ces faits, Hirn rendait un inappréciable service à la science par la fondation d'une méthode expérimentale, complète et générale, susceptible d'être appliquée à toutes les machines thermiques.

Depuis, de nombreux chercheurs ont suivi la voie frayée par le célèbre physicien. Néanmoins, bien des points restent encore douteux. D'ailleurs, le problème est extrêmement complexe. Les parois n'interviennent pas seulement pendant l'admission; leur action s'exerce durant toute la course, directe ou rétrograde, du piston; la chaudière, les conduites de vapeur, le cylindre, les conduites d'échappement et le condenseur forment dans leur ensemble un vaste récipient, dont les différentes parties ont entre elles des communications incessamment modifiées, dont les surfaces sont à des températures différentes et constamment variables. Des effets de vaporisation et de distillation se

produisent continuellement d'un point à l'autre, en vertu du principe de la paroi froide.

À la rigueur, les températures extrêmes entre lesquelles évolue la machine à vapeur peuvent, l'une atteindre 400 degrés avec une très haute surchauffe, l'autre descendre à 30 degrés avec un excellent condenseur. En fait, les limites ordinaires sont de 200 et 35 degrés. Quand il n'y a pas condensation, la limite inférieure remonte à 100 degrés au moins. Dans ces trois hypothèses, le coefficient économique du cycle de Carnot, maximum des coefficients fournis par les cycles réalisables, a respectivement des valeurs de 0.55, 0.35, 0.21.

Mais le coefficient pratique est toujours moindre. En raison du caractère imparfait de la combustion, des dégagements de chaleur dans la cheminée, du rayonnement, de la perte à l'enlèvement des cendres et escarbilles, le rendement du générateur, tuyauterie comprise, par rapport au pouvoir calorifique du combustible, varie généralement de 60 à 70 p. 100. Indépendamment de la perte au condenseur, tenant aux calories que les parois du cylindre prennent et restituent d'une manière intempestive à la vapeur, une autre perte causée par le rayonnement se produit dans le récepteur, dont le rendement thermodynamique (proportion de la chaleur transformée en travail à la chaleur incorporée par la chaudière au fluide évoluant) ne dépasse guère 15 à 20 p. 100. Enfin, pour passer du travail indiqué au travail effectif, il faut encore opérer une réduction de 10 à 20 p. 100, afin de tenir compte des frottements et du prélèvement nécessaire aux pompes du condenseur et aux pompes alimentaires. Le rendement global, dans de bonnes conditions courantes, est donc de $0.65 \times 0.15 \times 0.85$, soit 0.08 environ. Une machine de 250 à 300 chevaux, à double expansion, recevant de la vapeur saturée à la pression effective de 8 kilogrammes, fonctionnant à condensation et munie d'enveloppes de vapeur, pourra consommer 6 kilogr. 700 de vapeur par cheval-heure *indiqué* ou 7 kilogr. 900 par cheval-heure *effectif*; si le générateur vaporise, par kilogramme de houille brute à 8,000 calories, 8 kilogr. 400 d'eau, dont 7 kilogr. 900 provenant du condenseur et 0 kilogr. 500 des purges, la consommation en com-

bustible sera de 1 kilogramme de houille brute par cheval-heure *effectif*, soit 760 grammes de charbon pur et sec par cheval-heure *indiqué*, en supposant que la houille renferme 10 p. 100 de cendres et d'humidité. L'accroissement de la puissance, la combinaison d'une forte pression initiale avec la triple expansion, le soin exceptionnel de la construction permettent d'élever le rendement thermodynamique, d'abaisser la consommation de vapeur à 5 kilogrammes par cheval-heure indiqué. Il est possible, au moyen de la surchauffe, d'aller plus loin, de porter le rendement thermodynamique à 0.21.

Le progrès du siècle a été considérable, car la machine de Watt ne rendait que 2 p. 100 au total. Pourtant, le rendement reste bien médiocre; les machines à vapeur portent en elles une cause certaine de faiblesse, la limitation de l'écart entre les températures extrêmes, écart très inférieur à celui que réalisent d'autres moteurs thermiques, comme les moteurs à explosion. Cette infériorité a heureusement pour contre-partie des mérites précieux, au point de vue de l'entretien, des facilités de manœuvre, de la souplesse, de la régularité; la machine à vapeur est encore loin de perdre sa suprématie industrielle.

Avant de clore ce rapide aperçu sur les machines fixes à piston, il est indispensable de dire quelques mots d'un admirable instrument, le servo-moteur, utilisé pour la commande du changement de marche des grandes machines (marine, laminoirs réversibles, moteurs d'extraction, etc.), quelquefois pour celle de la détente variable par le régulateur, pour la manœuvre du gouvernail des navires et généralement de tous les engins dont le déplacement exige une précision parfaite, beaucoup de promptitude et de très grands efforts. Le mérite de la création du servo-moteur appartient dans une large mesure à M. J. Farcot.

L'appareil est essentiellement constitué par les organes suivants : 1° un moteur à renversement de marche, le dispositif de renversement comportant un point mort, c'est-à-dire une position de la distribution dans laquelle l'action motrice est suspendue, tandis qu'elle tend à produire le mouvement direct ou rétrograde, suivant que la distribution s'écarte de part ou d'autre du point mort; 2° des rênes, ou organes

permettant de modifier à la main la distribution en l'écartant du point mort; 3° un organe modificateur de la distribution, conduit par le moteur lui-même et agissant en sens inverse des rênes. Toujours le moteur marche dans le sens qui lui est indiqué par les rênes, et l'équilibre n'est possible que lorsque, par l'effet de ce mouvement, la distribution a été ramenée au point mort, c'est-à-dire pour une position du moteur correspondant à la position donnée aux rênes.

Travaillant à pleine pression sans détente, les servo-moteurs peuvent recevoir leur force de l'eau en charge aussi bien que de la vapeur.

2. *Récepteurs rotatifs.* — Ce n'est pas d'hier que datent les tentatives ayant pour objet de produire directement la rotation d'un arbre en faisant agir la vapeur non sur un piston à mouvement alternatif, mais sur un *diaphragme* tournant. Dès 1769, James Watt proposait une machine rotative constituée par un récipient en forme d'anneau creux ou canal circulaire, dans lequel devaient se mouvoir des pistons. Parmi les premières machines construites sur ce principe, rappelons celles de Yule (1836), de Lamb (1842), de Behrens (1847): cette dernière a rendu de bons services comme petit cheval alimentaire, pour les chaudières marines. Beaucoup d'autres types ont été étudiés et présentés plus récemment, surtout depuis l'application générale de l'hélice à la propulsion des navires. Plusieurs modèles intéressants figuraient encore à l'Exposition de 1900.

Le système offre, en effet, quelque chose de séduisant. Il supprime les intermédiaires entre l'organe pressé par la vapeur et l'arbre de couche, permet d'actionner commodément les outils à rotation rapide (pompes centrifuges, ventilateurs, scies circulaires, essoreuses, perforatrices, etc.), développe une grande puissance sous un faible volume. La vitesse atteint facilement 1,000 tours par minute et davantage. Mais la machine rotative comporte des pièces frottantes difficiles à ajuster et à maintenir en bon état. Jusqu'ici, l'écueil a été l'impossibilité presque absolue de tenir étanche le joint de vapeur au contact des parties fixes avec les parties mobiles et d'éviter des fuites funestes au rendement, sans exagérer les résistances dues aux frottements.

En 1900, la Société Hult frères, de Stockholm, montrait des dis-

positifs remarquables, étudiés en vue d'échapper à cette alternative. Partout où la chose était possible, elle substituait le roulement au glissement; ailleurs, elle n'admettait que des glissements différentiels. L'appareil se composait essentiellement d'une enveloppe cylindrique, mobile autour de son axe, et d'un tambour intérieur de moindre diamètre, excentré, pouvant de même tourner sur son axe, touchant l'enveloppe par une génératrice et l'entraînant dès lors dans son mouvement, enfin armé de palettes qu'un ressort et la force centrifuge poussaient hors de leurs rainures jusqu'au contact de l'enveloppe.

Une catégorie de récepteurs rotatifs appelée à un plus brillant avenir est celle des *turbines à vapeur*, dont la réalisation pratique constitue l'un des progrès marquants de la fin du siècle.

Pour en faire un historique complet, il faudrait remonter à l'éolipyle de Héron d'Alexandrie (120 ans avant notre ère), citer ensuite la roue à vapeur de Giovanni Branca (1629), le moulinet à réaction de James Sadler (1791), les disques tournants et séparés par des distributeurs fixes de Réal et Pichon (1827), etc. Les premiers essais industriels ont commencé avec Leroy (1838) et Tournaire (1853). Procédant des mêmes principes que l'appareil Réal et Pichon, la turbine Leroy était à haute pression, détente et condensation. Quant à la turbine compound de Tournaire, elle a constitué le prototype des turbo-moteurs actuels.

On ne peut qu'admirer la lumineuse clarté avec laquelle l'éminent ingénieur des mines dégagea et formula les principes devant présider à la construction des turbines. Dans toute machine à action dynamique, il existe certaines proportions nécessaires entre les vitesses du fluide agissant et celles des organes récepteurs; ces vitesses sont forcément de grandeurs comparables. Avec l'eau, la chose n'offre pas de difficultés: l'eau a une densité assez forte et ne prend sous les charges en usage que des vitesses comparables à celles dont s'accommodent les organes de machines. La vapeur d'eau se comporte autrement: elle sort du générateur, animée de vitesses telles qu'aucun organe métallique ne serait capable de les admettre; l'allure de la rotation du récepteur dépasserait les limites acceptables et les orifices deviendraient extrê-

mement petits, même pour une grande dépense de fluide, si la vapeur devait être utilisée par de simples roues analogues aux turbines à eau. Tournaire indiquait donc la nécessité absolue d'abaisser progressivement la pression, soit d'une manière continue, soit par fractions successives. Sa machine comprenait une suite de turbines, montées par groupe sur des axes distincts et destinées à recevoir la vapeur les unes après les autres. Des couronnes fixes d'aubes directrices séparaient ces turbines, qui livraient accès au fluide et l'évacuaient à la même distance de l'axe. Les aubes des couronnes directrices et des roues présentaient des passages de plus en plus larges, et les dimensions des appareils croissaient du premier au dernier groupe. Tournaire analysait d'ailleurs les causes de pertes : fuites par les joints des pièces fixes et des pièces mobiles; chocs et tourbillonnements à l'entrée et à la sortie des aubes; frottements dans des canaux très étroits. Il énumérait les exigences de la construction (précision minutieuse de l'exécution et du montage, étude attentive du tracé des aubes et des canaux, etc.) et recommandait les engrenages hélicoïdaux, dits de *White*, afin d'obtenir une démultiplication douce et sans secousses.

Les principes étaient posés. Cependant les turbines à vapeur n'ont pu entrer immédiatement dans le domaine de la pratique. Il a fallu auparavant acquérir une connaissance plus approfondie des lois relatives à l'écoulement de la vapeur, se familiariser avec les grandes vitesses de rotation, disposer de matériaux d'une qualité supérieure, porter l'ajustage à un haut degré de précision.

Tandis que l'équation de Bernouilli suffit pour le calcul approximatif des vitesses d'écoulement dans les turbines hydrauliques, la question est plus complexe pour les turbines à vapeur. L'énergie potentielle à mettre en balance avec l'énergie cinétique dépend non seulement de la pression, mais aussi de la température, si la vapeur est surchauffée, ou du titre, si la vapeur est humide.

La section des canaux doit varier en raison inverse du produit de la vitesse par le poids spécifique. Ce produit atteint son maximum quand la pression s'est abaissée aux $58/100$ de la pression initiale. Lorsque le canal n'est le siège que d'une faible chute de pression, son rétré-

cissement continue jusqu'à l'extrémité aval. Au contraire, dans le cas d'une tuyère où la pression descend de plus des $42/100$, le profil, d'abord convergent, devient ensuite divergent; néanmoins le débit reste exclusivement déterminé par la section du col.

Il importe de réduire au minimum l'énergie finale, potentielle et cinétique, que la vapeur emportera à sa sortie de la machine et, pour cela, de restreindre la vitesse absolue d'évacuation, de pousser très loin la détente, de n'abandonner le fluide qu'à un condenseur donnant un vide excellent.

Un avantage considérable s'attache à l'emploi de la vapeur surchauffée, afin de prévenir les condensations intérieures et de diminuer les frottements.

Divers inventeurs ont proposé des turbines radiales, centripètes ou centrifuges. Mais la disposition axiale, dans laquelle la vapeur circule parallèlement à l'arbre, a seule prévalu.

On distingue les turbines à réaction, où la détente s'effectue partie dans les distributeurs fixes, partie dans les aubes des roues réceptrices, et les turbines à action pure, où elle s'accomplit entièrement dans les distributeurs. La première catégorie, dont relève le type Parsons, comporte toujours des roues multiples. Quant à la seconde catégorie, elle admet soit une roue unique, soit des roues multiples : le type de Laval, qui se rattache à cette catégorie, n'a qu'une roue. Les turbines à action pure sont soustraites à la forte poussée longitudinale que la différence des pressions à l'amont et à l'aval des roues développe dans les turbines à réaction et qu'il faut combattre par des artifices appropriés.

Au point de vue du rendement thermodynamique, les turbines à vapeur ont deux avantages importants : la détente peut y être poussée jusqu'à la pression même du condenseur; elle est sensiblement adiabatique. Primitivement, les turbines fonctionnaient à échappement libre et dévoraient la vapeur; aujourd'hui, leur consommation se rapproche de celle des bons moteurs à piston pour des services similaires : des expériences faites sur un turbo-alternateur de 1,000 kilowatts n'ont révélé qu'un écart de 10 p. 100.

Le type Parsons et le type de Laval, célèbres dès avant la fin du

siècle, méritent quelques indications, même dans cet aperçu sommaire.

M. Parsons, dont les études sur les machines rotatives remontent à 1876, créa en 1884 sa turbine multiple à réaction. Le premier appareil, présenté en 1885 à l'Exposition des inventions de Londres, avait une puissance de 10 chevaux et tournait à 18,000 tours par minute; il comprenait deux séries de 15 turbines d'un diamètre uniforme, disposées symétriquement de part et d'autre d'une arrivée de vapeur centrale, et fonctionnait sans condensation. Des améliorations successives y furent apportées. Au tambour unique l'inventeur substitua trois tambours de diamètres croissants et de hauteurs décroissantes, combinaison plus favorable à une détente prolongée. Cet arrangement appelait la condensation, progrès capital réalisé en 1891. En même temps, les unités se faisaient plus puissantes, allaient jusqu'à 1,600 chevaux pour une usine électrique et 5,500 chevaux pour un torpilleur. Les vitesses de rotation étaient ramenées à 3,000 et 1,500 tours. Cessant de s'astreindre à avoir deux séries symétriques de turbines, le constructeur recourait à des pistons compensateurs pour contre-balancer la poussée longitudinale. Dans les turbines actuelles, la vapeur est fournie en bouffées successives par une soupape à double siège, qui s'ouvre et se ferme alternativement sous l'action d'un servomoteur; un régulateur électro-magnétique ou mécanique gouverne ce servomoteur et règle les périodes de succession des bouffées. Les jeux indispensables rendent inutile tout graissage intérieur; seuls, les paliers sont à lubrifier; la circulation de l'huile est assurée par des pompes.

La turbine à action pure de l'ingénieur suédois de Laval a été créée en 1889. Sa première installation date de 1892; elle s'est immédiatement recommandée par ses faibles dimensions et par la commodité de son emploi, surtout pour les menues applications. Dans le modèle le plus puissant exposé en 1900, celui de 300 chevaux, la turbine mesurait 0 m. 75 de diamètre et faisait, en marche normale, 9,000 ou 10,000 tours par minute, ce qui donnait à la circonférence une vitesse approchant de 400 mètres par seconde; les moteurs de moindre puissance ont des disques plus petits et, bien que la vitesse de rotation augmente, la vitesse linéaire des aubes diminue; pour le type de 5 chevaux

par exemple, le diamètre est de 0 m. 11, la vitesse de rotation de 30,000 tours et la vitesse linéaire des aubes de 175 mètres. Avec de pareilles vitesses, le couple reste très faible et l'arbre portant la turbine peut être fort mince. Ces vitesses, inutilisables directement, doivent subir une réduction, qui s'opère par un engrenage à chevrons. Les ajustages sont commandés par des obturateurs à pointeau, qu'on manœuvre au moyen d'un volant à main, de manière à ouvrir ou fermer complètement un certain nombre de canaux; en outre, un régulateur à force centrifuge agit automatiquement sur l'arrivée générale de vapeur, à l'aide d'un papillon. Pour prévenir l'éclatement du disque tournant, il faut l'établir en acier de choix et le renfler progressivement vers le centre. La turbine doit aussi être exactement centrée et parfaitement normale à son axe de rotation. Sous ce rapport, une rigueur mathématique est impossible; mais l'inventeur a su tirer un parti très heureux de la flexibilité de l'arbre, qui repose, d'ailleurs, à l'une de ses extrémités, sur un palier à rotule; au delà d'une vitesse critique, pour laquelle la durée d'un tour coïncide avec la période d'oscillation de la tige vibrante formée par l'ensemble de l'arbre mince et de son disque, le système déformable se rapproche de l'état limite correspondant à l'exacte rotation autour de l'axe d'inertie, sans pression sur les paliers du fait des forces centrifuges. Un dispositif de sécurité, cassant le vide du condenseur en cas d'emballement accidentel, prévient le danger d'un emballement de ce genre.

Parmi les turbines à action de date récente, il y a lieu de citer la turbine Curtis, à un ou plusieurs étages suivant la puissance.

M. Rateau s'est livré, au sujet des turbo-moteurs, à de remarquables travaux théoriques, qui seront consultés avec fruit.

3. *Machines mi-fixes ; locomobiles.* — Quand le travail à développer n'est pas très considérable, les dépenses de combustible ne sont le plus souvent qu'une assez faible fraction du prix de la force motrice : l'intérêt et l'amortissement du capital, l'entretien, le graissage, le personnel, etc., forment un total supérieur à la dépense de charbon. En pareil cas, la machine mi-fixe, comprenant une machine et un générateur de dimensions modestes réunis sur la même base, peut rendre

de très utiles services : elle occupe peu de place, n'exige pas de fondations ou du moins ne demande que des fondations légères, s'installe facilement ; un seul ouvrier suffit à conduire tout l'appareil ; l'ensemble se déplace sans frais notables, avantage fort sérieux, surtout alors que les industries se transforment fréquemment et entreprennent les travaux les plus variés. Les commodités offertes par les machines mi-fixes sont telles, que leur champ d'application s'est progressivement étendu et que les constructeurs en font aujourd'hui de 100 chevaux et davantage, avec double expansion, détente variable, même condensation. À l'Exposition de 1900, l'Allemagne, qui est allée fort loin dans cette voie, présentait deux modèles de 250 chevaux.

S'il s'agit non plus d'une installation d'usine, mais de travaux dont la durée sur le même point ne doit pas excéder quelques heures, quelques jours ou quelques semaines, la machine mi-fixe est montée sur roues et devient la locomobile. On la déplace ordinairement à l'aide de chevaux ; parfois, elle est rendue automotrice, grâce à un mécanisme de connexion qui relie le moteur aux roues d'arrière. Les circonstances dans lesquelles il faut avoir recours aux locomobiles présentent une infinie variété et sont bien connues. Ce sont ces machines nomades qui fournissent la force motrice aux chantiers de travaux publics ou privés pour les épaissements, le battage des pieux, la confection des mortiers, l'élévation des matériaux, etc. ; dans les grandes villes, elles apportent un concours incessant aux entrepreneurs d'édifices ou de maisons particulières. Leur domaine a englobé nombre d'exploitations agricoles ; elles ont peu à peu envahi le village, la ferme, le terrain de culture, où elles portent non seulement la puissance mécanique, mais aussi les notions et le goût de la science. Dès avant James Watt, l'idée de transformer la machine à vapeur en un outil mobile avait été émise par Smeaton, le célèbre ingénieur du phare d'Eddystone ; toutefois cette idée n'a pris corps et n'a revêtu une forme pratique que beaucoup plus tard. La locomobile est fille de la locomotive ; comme le puissant engin des chemins de fer, elle doit ses propriétés essentielles à la légèreté de son mécanisme et de son générateur ; elle se caractérise de même par une marche rapide à haute pression et par une chaudière tubulaire.

Deux systèmes de générateurs horizontaux tubulaires à foyer intérieur se partagent les préférences de la plupart des constructeurs : système à retour de flamme avec vaporisateur amovible, type Thomas-Laurans ; système à flamme directe, genre locomotive. Le premier système a surtout prévalu pour les machines mi-fixes de quelque puissance et le second pour les locomobiles. Dans les appareils de petites dimensions, comme les locomobiles agricoles, la chaudière à flamme directe est assez généralement formée d'un corps cylindrique à axe vertical environnant le foyer et d'un corps cylindrique horizontal renfermant le faisceau des tubes à fumée. Pour certaines applications, les appareils mobiles de faible puissance sont quelquefois munis de chaudières verticales ; on obtient ainsi des engins très peu encombrants. À priori, les chaudières avec foyer extérieur paraissent s'adapter médiocrement aux machines mi-fixes ou locomobiles ; néanmoins des constructeurs de générateurs à tubes d'eau ont créé des types transportables.

3. Statistique. — Le tableau suivant, dressé d'après les statistiques du Ministère des travaux publics, montre quel a été le développement progressif des machines à vapeur en France depuis 1840 :

ANNÉES.	LOCOMOTIVES.		MACHINES				TOTAUX.	
			DE BATEAUX ⁽¹⁾ .		D'INDUSTRIES DIVERSES ⁽²⁾ .			
	NOMBRE.	PUISSANCE. chev ^s -vap ^r .	NOMBRE.	PUISSANCE. chev ^s -vap ^r .	NOMBRE.	PUISSANCE. chev ^s -vap ^r .	NOMBRE.	PUISSANCE. chev ^s -vap ^r .
1840....	142	14,200	263	11,422	2,591	34,350	2,996	59,972
1850....	973	97,300	537	22,421	5,322	66,642	6,832	186,363
1860....	3,101	310,100	681	36,690	14,936	180,554	18,718	527,344
1870....	4,835	483,500	973	59,573	27,958	341,443	33,761	884,516
1880....	7,289	2,994,000	2,072	292,347	43,182	544,152	52,543	3,830,499
1890....	9,909	4,388,000	1,606	599,664	64,234	919,755	75,749	5,907,419
1900....	12,194	5,744,000	2,013	875,680	84,006	1,989,582	98,283	8,609,262

⁽¹⁾ Non compris les bâtiments de la marine militaire.
⁽²⁾ Y compris les machines fixes employées dans l'industrie des chemins de fer et les appareils auxiliaires en service sur les bâtiments et bateaux.

Abstraction faite des chemins de fer, de la marine et de la batellerie, l'ensemble des machines de France représentait, en 1900, une puissance totale de 1,791,000 chevaux environ, dont 408,000 pour

l'industrie des tissus et des vêtements, 314,000 pour la métallurgie, 277,000 pour les mines et carrières, 181,000 pour les industries alimentaires, 139,000 pour la production de l'électricité, 134,000 pour les entreprises de travaux, 133,000 pour l'agriculture, etc.

Malgré le développement des machines à vapeur, le nombre des accidents tend à décroître. Pendant la période 1871-1880, la statistique de l'industrie minérale avait enregistré une moyenne annuelle de 32 tués et 39 blessés; durant les périodes 1881-1890 et 1891-1900, ces chiffres sont respectivement descendus à 31 tués et 26 blessés, 21 tués et 24 blessés. La diminution du nombre des victimes par 10,000 chaudières ou récipients est beaucoup plus accusée : de 1871 à 1880, 4 tués 3 et 5 blessés 4; de 1881 à 1890, 3.1 et 2.6; de 1891 à 1900, 1.7 et 1.9. Il y a là un résultat fort intéressant, dû principalement aux progrès de la construction, ainsi qu'à la surveillance combinée de l'État et des associations de propriétaires d'appareils à vapeur.

§ 3. MOTEURS THERMIQUES AUTRES QUE LES MACHINES À VAPEUR.

1. **Considérations générales.** — Après les machines à vapeur ordinaires, il convient d'examiner sommairement les machines motrices qui empruntent leur puissance à la chaleur par l'intermédiaire d'un corps autre que la vapeur d'eau : ces moteurs prennent, en effet, chaque jour, une place plus importante. Mais, auparavant, il me faut revenir sur la question du rendement thermique des machines à vapeur.

Dans ces machines, la quantité de chaleur transformée en travail est minime relativement à celle qui traverse l'appareil. Même en négligeant l'écart entre le travail indiqué et le travail effectif, les meilleures n'utilisent pas plus de 15 p. 100 des calories contenues dans le combustible, proportion bien peu satisfaisante eu égard au degré de perfection atteint par l'art des constructions mécaniques. Ce fait, depuis longtemps constaté, passait jadis pour inhérent à la vapeur d'eau; on l'attribuait au calorique latent qu'elle retient et qui se perd à l'échappement. De là, les nombreuses tentatives faites en vue de substituer à la vapeur d'eau des fluides différents, tels que la vapeur d'éther ou de chloroforme, l'ammoniaque, l'air atmosphérique, etc. Plus tard, les progrès réalisés par la théorie mécanique de la chaleur ont jeté un jour nouveau sur la question. On a appris que le rendement dynamique de la chaleur traversant une machine thermique dépend avant tout de l'écart des températures entre lesquelles évolue la machine. Or cet écart est faible dans les machines à vapeur ordinaires : la température, à la sortie du cylindre, ne saurait être abaissée au-dessous de celle du corps froid dont on dispose, eau, air, etc.; d'autre part, la température à la chaudière se trouve limitée par la progression rapide suivant laquelle s'élèvent les tensions de la vapeur d'eau saturée. En réalité, la principale chute de température a lieu entre le foyer et la chaudière, et cette chute, qui se mesure par 1,000 ou 1,200 degrés, reste complètement inutilisée au point de vue de la production du travail : telle est la cause capitale du faible

effet utile de nos moteurs à vapeur. Une autre cause réside dans la multiplicité des transformations que doit subir la chaleur avant de ressortir à l'état de travail : il faut que le calorique se dégage du combustible, qu'il pénètre dans la chaudière pour former la vapeur d'eau, que cette vapeur se rende au cylindre et agisse sur le piston; le travail ainsi engendré est recueilli sur l'arbre de couche par une transmission plus ou moins compliquée.

Si les propriétés de la vapeur d'eau ne permettent pas d'obtenir des rendements thermiques satisfaisants, rien ne semble s'opposer à ce que d'autres fluides, doués de propriétés physiques différentes, se prêtent au contraire à des rendements élevés. Les recherches faites en vue d'améliorer l'utilisation de la chaleur ont donc eu pour but de faire agir certains fluides à de hautes températures, autant que possible à la température même de combustion; elles ont tendu aussi à rendre plus directe et par suite plus économique la transformation de la chaleur en travail. Un chemin considérable a été parcouru dans cette voie.

L'augmentation du rendement thermique ne suffisait pas pour assurer la vie des nouveaux moteurs. Ce qui importe surtout à l'industrie, c'est l'économie, et la dépense relève non seulement de la proportion de chaleur utilisée, mais aussi du prix unitaire de ces calories, prix dans lequel entrent des facteurs multiples (prix du combustible, frais de main-d'œuvre et d'entretien, intérêt et amortissement du coût des appareils, etc.). À cet égard, de longs efforts ont précédé le succès et beaucoup reste à faire.

D'autres éléments entrent encore en ligne de compte, les uns d'ordre général, les autres spéciaux à l'affectation du moteur : par exemple, la simplicité du moteur, la facilité de sa conduite, la rapidité de sa mise en marche, la régularité de son fonctionnement, ses garanties pour la sécurité, l'espace qu'il occupe, son adaptation au travail à exécuter, etc. Il y a là des conditions diverses, dont plusieurs, variables avec les circonstances, exercent parfois une influence capitale sur le choix des industriels. Les moteurs thermiques sans chaudière à vapeur offrent souvent des avantages qui font pencher la balance en leur faveur.

En l'état, la machine à vapeur garde sa prépondérance marquée, principalement pour les grandes puissances. Néanmoins les machines thermiques sans chaudière ont gagné beaucoup de terrain et rendent, en nombre de cas, les plus utiles services.

2. Moteurs à air chaud. — Les moteurs à air chaud sont entrés les premiers dans la carrière. Ils furent d'abord à foyer extérieur : telle la machine créée en 1816 par Robert Stirling. Cette machine, à masse d'air constante, alternativement chauffée et refroidie, se caractérisait par l'absence de tiroirs, de soupapes ou d'autres organes de distribution ; elle comportait un régénérateur de chaleur, formé de toiles métalliques ou autres substances offrant une surface de contact étendue et recueillant la chaleur des gaz à un certain moment de leur évolution, pour la restituer à un autre moment. Dans la même famille se range la machine Rider, déjà connue en 1878. et fort appréciée aux États-Unis, spécialement pour les élévations d'eau des fermes isolées : le principe de ce moteur était semblable à celui de la curieuse machine Franchot, dont le modèle fut construit en 1855 et qui présentait deux cylindres de mêmes dimensions, avec pistons attaquant deux manivelles calées à angle droit sur un arbre unique ; ces cylindres communiquaient par deux conduits renfermant chacun un régénérateur ; l'un des cylindres était chauffé par un foyer, l'autre refroidi par une circulation d'eau. Des dispositions analogues à celles de la machine Stirling ont été appliquées dans le moteur plus récent de Laubereau, que distingue surtout l'absence de régénérateur.

Parmi les moteurs à air chaud, avec foyer extérieur, il en est qui, à l'inverse des précédents, sont munis d'un appareil de distribution. Ces moteurs ont pour type l'ancienne et célèbre machine d'Ericsson, à régénérateur de chaleur (1852). À la suite d'expériences prolongées, Ericsson abandonna l'emploi des régénérateurs et se livra à la construction des petites machines caloriques dans le genre de celles de Laubereau.

Aujourd'hui, les régénérateurs sont délaissés, malgré leurs avantages théoriques.

Toutes les machines précédentes ont ce caractère commun, que le

chauffage de l'air se fait par conductibilité à travers des surfaces métalliques. L'utilisation de la chaleur du combustible y est médiocre; il faut, du reste, modérer le chauffage afin de ménager les enveloppes. Aussi les moteurs de ce genre ne semblent-ils convenir qu'au cas de forces restreintes, où la question d'économie est accessoire et où la question de commodité prend au contraire une prépondérance manifeste.

Quand il s'agit de réaliser des puissances plus considérables, on place le foyer à l'intérieur de la machine, de telle sorte que l'air devient à la fois moteur et comburant. Un cylindre de pompe puise l'air au dehors et le refoule dans un réservoir, où se trouve le foyer; de là, l'air chauffé et en partie brûlé arrive par une distribution au cylindre moteur, dont le piston agit sur l'arbre de couche; une partie du travail développé sert au fonctionnement de la pompe à air. Le combustible (coke) est introduit au moyen d'un véritable sasement. Ce système remonte à une époque déjà éloignée; il a donné lieu à des tentatives persévérantes et à des expériences suivies de la part de Belou, dont l'aéromoteur date de 1860; Belou s'efforçait de construire des machines très puissantes et se proposait comme but l'économie de combustible, mais ses recherches et son ingéniosité échouèrent devant des difficultés pratiques. Plus tard, d'habiles constructeurs parvinrent à tourner en partie ces difficultés et à faire fonctionner pratiquement des moteurs de l'espèce, du moins pour de petites forces (machines Hock, Brown, Todt, et machine Bénier, où le foyer occupe le fond même du cylindre moteur).

L'Exposition de 1900 n'a reçu qu'un très petit nombre de moteurs à air chaud, des systèmes Brown et Rider-Ericsson. Dans la machine Ericsson, le cylindre était unique, muni au sommet d'une boîte à eau et exposé au feu par la partie inférieure; deux pistons le parcouraient, l'un recevant et transmettant la force, l'autre faisant passer l'air alternativement d'une extrémité à l'autre.

3. Moteurs à gaz. — Les inconvénients du foyer intérieur tiennent surtout à l'emploi d'un combustible solide brûlé en morceaux sur une grille. On conçoit la possibilité de supprimer la grille et de faire pé-

nétrer dans le cylindre un combustible assez divisé pour s'unir intimement à l'oxygène de l'air et pour donner une réaction presque instantanée. Trois types nouveaux de machines ont ainsi pris naissance : le moteur à poussière de charbon (combustible solide); le moteur à pétrole ou à essence (combustible liquide); le moteur à gaz d'éclairage ou à gaz pauvre (combustible gazeux). Seuls, les deux derniers types appellent ici quelques indications; les moteurs à gaz doivent, d'ailleurs, occuper la première place au point de vue chronologique.

Presque toutes les machines alimentées par le gaz d'éclairage ou ses succédanés sont à explosion. Leur principe, imaginé dès avant le ^{xix}^e siècle, offre une grande simplicité. Introduit dans le cylindre, le gaz se mélange à l'air qu'il doit échauffer; au moment voulu, ce mélange est allumé par une étincelle électrique ou autrement; une explosion se produit; les gaz, à haute pression et à température élevée, agissent par leur détente sur le piston et engendrent le travail moteur. Pour empêcher la destruction des organes, on refroidit le cylindre par une circulation d'eau.

Au commencement du siècle, Philippe Lebon, cherchant à vulgariser le gaz d'éclairage, signalait le parti qu'on pourrait en tirer pour la production de force motrice; en 1801, dans une addition à son brevet de 1799, il exposait un projet de moteur à gaz et prévoyait même l'un des perfectionnements les plus notables qui aient été ultérieurement réalisés, la compression préalable du mélange d'air et de gaz. De nombreux chercheurs suivirent le sillon ouvert par Lebon. Mais le mérite des premières applications industrielles était réservé à Lenoir et à Hugon.

Créée en 1860, la machine horizontale à double effet de Lenoir rappelait en bien des points la machine à vapeur. Elle avait le défaut de consommer plus de 3 mètres cubes de gaz d'éclairage par cheval-heure, d'exiger une quantité d'eau considérable pour le refroidissement, de nécessiter le graissage continu du piston. Breveté en 1858 et construit en 1862, le moteur Hugon se caractérisait par l'inflammation au moyen d'un brûleur et non d'une étincelle électrique et par le refroidissement à l'aide d'une injection dans le

cylindre d'eau pulvérisée, qui jouait en même temps le rôle de lubrifiant.

Il importait de diminuer la dépense excessive de gaz et d'atténuer notamment les déperditions de force dues au refroidissement du cylindre ainsi qu'à l'imperfection du cycle. Divers constructeurs y consacrèrent leurs efforts. On peut citer, à titre historique, la machine de W. Siemens, comportant quatre cylindres et munie d'un régénérateur.

En 1862, Beau de Rochas prit un brevet pour un système de moteur dans lequel devait être appliqué pour la première fois le cycle à quatre temps. Son idée si féconde, qu'il ne réalisa pas lui-même, fut recueillie par Otto : nous en verrons plus loin le succès.

À l'Exposition de 1867, on remarqua beaucoup le moteur Otto et Langen, où la déperdition de chaleur résultant du contact des gaz avec le cylindre refroidi était atténuée par la grande vitesse imprimée au piston pendant la détente. Cette machine, du type dit *atmosphérique*, donnait d'excellents résultats au point de vue de la consommation de gaz qui descendait à 900 litres par cheval-heure. Néanmoins sa marche bruyante et la complication de son mécanisme la firent délaisser au bout de quelques années. Les moteurs Gille (1874) et Hallewell (1875), appartenant aussi à la catégorie des machines atmosphériques, eurent le même sort.

La nouvelle machine Otto, qui apparut en 1878, était un moteur à compression établi sur le principe du cycle à quatre temps. Elle obtint immédiatement un vif succès. Le cylindre y remplissait un double office : il servait à la compression et à la production du travail moteur. C'est seulement après deux révolutions de l'arbre, soit après quatre coups de piston, dont un seul transmettant à cet arbre une impulsion motrice, que le cycle se trouvait fermé : au premier coup, le mélange explosif était aspiré dans le cylindre ; le second soumettait ce mélange à la compression ; au troisième, l'explosion avait lieu avec détente ; les gaz résiduels étaient partiellement expulsés au quatrième coup. La compression, déjà indiquée par Lebon (1801), puis par Reithmann (1838), Degrand (1859), etc., augmentait le rendement. Quant à la conservation partielle des gaz brûlés, elle

avait pour effet, tout à la fois, de simplifier le mécanisme du moteur et de concourir à l'élévation du rendement, en permettant la réalisation du cycle à quatre temps dans un seul cylindre. La dépense de gaz par cheval-heure était de 800 litres. Abordant les grandes puissances, MM. Otto et Langen construisirent bientôt un moteur de 50 chevaux.

D'autres moteurs figuraient également à l'Exposition de 1878 : le moteur Bisschop, à double effet, utilisant la pression atmosphérique, ménageant au fond du cylindre un matelas d'air et substituant le simple rayonnement à la circulation d'eau pour le refroidissement; le moteur Simon, remplaçant l'explosion par la combustion lente des gaz comprimés avant leur admission dans le cylindre et ajoutant à l'action de ces gaz celle d'un courant de vapeur d'eau; le moteur oscillant Ravel.

La période décennale 1878-1889 fut surtout une période de vulgarisation des moteurs au gaz d'éclairage, qui, d'ailleurs, profitèrent du développement de l'éclairage électrique. Quand s'ouvrit l'Exposition de 1889, le moteur Otto de 1878 gardait sa primauté; il allait jusqu'à 100 chevaux. À côté de lui se montraient : un moteur Lenoir, peu différent; un moteur Charon, à quatre temps, proportionnant la consommation de gaz à la résistance; un moteur Niel, ayant le même cycle et présentant une distribution par robinets coniques; des moteurs à deux temps, tels que celui de Ravel, où la compression se faisait dans un réservoir spécial et dont la course arrière, divisée en deux périodes, correspondait à l'échappement, à l'admission et à une compression supplémentaire du mélange tonnant; etc.

Une nouveauté de 1889 mérite qu'on y insiste. Bien que la consommation de gaz d'éclairage se fût abaissée à 600 ou 700 litres par cheval-heure, la force produite coûtait encore trop cher. Les constructeurs s'ingénierent à trouver un gaz spécial, non éclairant, plus économique que le gaz d'éclairage et susceptible d'être fabriqué partout. Ainsi naquit le gazogène Dowson, à gaz pauvre.

C'est de 1889 que date l'ère de véritable concurrence entre les moteurs à gaz et les moteurs à vapeur. L'Exposition de 1900 a marqué une nouvelle et glorieuse étape.

Le triomphe du moteur classique à quatre temps et à simple effet s'est affirmé. Cependant des rivaux sérieux se dressent en face de lui. D'une part, le perfectionnement des garnitures métalliques étanches facilite l'établissement des machines à double effet, plus puissantes pour un même poids. D'autre part, le quatrième, le premier et le deuxième temps peuvent être réunis en un seul, pourvu que la compression soit commencée dans des pompes intermédiaires, et ce dispositif se prête à la suppression des soupapes d'échappement. Une évolution semble probable vers les deux temps et le double effet, avantageux par l'abaissement du prix de revient et l'augmentation de la régularité du fonctionnement.

Parmi les progrès généraux, se placent : la substitution de soupapes aux tiroirs, qui s'accommodaient mal des compressions élevées; l'accroissement de la compression; l'accélération de la vitesse; la suppression de la glissière; la diminution de volume et l'allègement que cette suppression a procurés; le remplacement du tiroir d'allumage par des magnétos ou des brûleurs, soit en métal, soit en porcelaine; la réduction de la dépense de combustible, qui, pour le gaz d'éclairage, est tombée à 500 ou 600 litres par cheval-heure; l'amélioration du rendement thermique, dont la valeur a largement dépassé 20 p. 100, s'achemine vers 30 p. 100 et même franchit déjà cette limite en certains cas. L'utilisation du gaz pauvre et celle du gaz des hauts fourneaux ont conduit à faire des machines de 500, 600, 1,000 chevaux.

L'emploi du gaz pauvre, auquel je viens de faire allusion, a pris une extension considérable. Au gazogène Dowson se sont joints d'autres appareils du même genre. Ces appareils n'exigent que 500 ou 600 grammes d'antracite ou de charbon maigre par cheval-heure; ils brûlent également du coke, mais excluent le charbon ordinaire, dont le goudron colle aux soupapes. Le gaz produit donne de 1,200 à 1,500 calories par kilogramme, soit le quart environ de ce que fournit le gaz d'éclairage; il est riche en oxyde de carbone, et des précautions doivent être prises dans l'intérêt de l'hygiène des ouvriers et du voisinage. Eu égard à leur prix élevé, les gazogènes ne pouvaient être appliqués aux petits moteurs que moyennant la suppression ou la simplification de leurs épurateurs : les constructeurs sont parvenus à

créer des générateurs très pratiques dits à aspiration et à les adapter même aux puissants moteurs de 100 chevaux.

Vers 1895 est venue l'idée fort heureuse d'employer les gaz des hauts fourneaux. Des expériences tentées presque simultanément en Allemagne, en Angleterre et en Belgique, l'ont bientôt consacrée; la société Cockerill, de Seraing, présentait à l'Exposition de 1900 un moteur de 600 chevaux parfaitement approprié à l'usage de ces gaz et destiné à la commande d'une machine soufflante; aujourd'hui, le chiffre de 1,000 chevaux est atteint. C'est une vraie révolution industrielle. D'après M. Hubert, ingénieur belge, un haut fourneau de 100 tonnes par jour dégage en une heure 8,000 mètres cubes de gaz, doué d'un pouvoir calorifique de 1,000 calories; ce dégagement suffit à alimenter des moteurs de 2,600 chevaux, rendant 20 p. 100, alors qu'utilisé pour des chaudières de machines à vapeur il serait incapable d'alimenter plus de 1,200 à 1,300 chevaux; la différence correspond à un bénéfice de 5 francs sur le prix de revient de la tonne de fonte. Il faut débarrasser les gaz des poussières; cette épuration s'effectue par divers procédés, notamment par la projection de la masse gazeuse contre les parois humides d'un tambour tournant à grande vitesse, par son passage dans un ventilateur à injection d'eau, ou par sa simple circulation dans des chambres à chicanes remplies d'un épais brouillard d'eau pulvérisée. En raison de la moindre richesse des gaz, on a été amené à accroître la compression, ce qui entraînait un refroidissement plus actif des soupapes et de la culasse. Généralement, l'allumage a lieu au moyen de bougies électriques. Si les moteurs monocylindriques du type Cockerill conviennent pour la commande des machines soufflantes, des moteurs à 2, 3 ou 4 cylindres peuvent être préférables pour d'autres usages, tels que le fonctionnement des stations centrales d'électricité établies près des hauts fourneaux. Les puissants moteurs au gaz de haut fourneau ont comme accessoires obligés des appareils de mise en marche.

Une industrie se liant à la métallurgie, celle de la fabrication du coke, donne aussi des quantités considérables de gaz combustibles. D'après les calculs les plus sérieux, la tonne de coke nécessaire pour produire une tonne de fonte correspond à 200 kilogrammes de gaz

riche, dont le tiers peut être recueilli et représente 800,000 calories utilisables.

Des essais ont été faits sur le gaz acétylène, dont le pouvoir calorifique est de 14,340 calories par mètre cube. La consommation rapportée au cheval-heure peut être inférieure à 200 litres. Néanmoins, au prix actuel de l'acétylène, la dépense reste excessive. En outre, les effets de ce gaz sont trop brisants.

Quel que soit le gaz mélangé à l'air, la régulation des moteurs puissants, de ceux qui actionnent les dynamos et notamment les alternateurs, constitue un problème délicat et incomplètement résolu. À cet égard, la machine à vapeur conserve une supériorité manifeste. Un système souvent appliqué consiste à empêcher la levée des soupapes d'échappement; il détermine des à-coups auxquels on doit pourvoir par l'accouplement de nombreux cylindres ou par l'adaptation de très lourds volants. Dans une seconde méthode, la levée des mêmes soupapes est simplement diminuée. Il existe encore d'autres procédés, comme l'étranglement de l'arrivée du mélange tonnant dans le cylindre avec ou sans changement des proportions du mélange, le taux de la compression étant maintenu et le titre abaissé ou inversement. De ces différents moyens, le second est le moins défectueux. Seuls, les moteurs à combustion, tels que le moteur Diesel, semblent aptes à apporter la solution; j'y reviendrai en exposant les progrès des moteurs à pétrole, auxquels ont été limitées les premières applications industrielles du type Diesel.

4. Moteurs à pétrole, à gazoline, à alcool. — Au gaz d'éclairage, au gaz pauvre des gazogènes et aux gaz des hauts fourneaux ou des fours à coke se sont ajoutés, comme combustible des machines à explosion ou à combustion, le pétrole brut, les gazolines extraites du pétrole, l'alcool pur ou carburé par l'addition de benzine. Ces combustibles liquides ont un pouvoir calorifique élevé: 10,000 à 12,000 calories par kilogramme, pour les pétroles de densité 0.87 à 0.94; 11,000 environ, pour les gazolines de densité 0.70; 6,500, pour l'alcool dénaturé de densité 0.834.

L'idée de recourir aux gazolines ou au pétrole est assez ancienne.

Elle ne paraît toutefois avoir pris une forme concrète que vers 1872, époque à laquelle Brayton fit breveter en Amérique un moteur à hydrocarbure lourd. L'air comprimé traversait une série de disques en bronze perforés, entre lesquels se trouvait une masse spongieuse imprégnée de pétrole; ainsi chargé de vapeur, il était projeté sur une toile métallique, derrière laquelle la combustion avait lieu sans interruption et sans explosion. Un moteur à essence fut exposé en 1878 et mentionné dans le rapport du jury. L'Exposition de 1889 montra d'assez nombreuses machines à pétrole ou à essence : ces appareils ne différaient des moteurs à gaz que par l'adjonction du carburateur, c'est-à-dire de l'organe où l'air se mélange aux vapeurs d'hydrocarbure; ils étaient principalement destinés à la petite industrie, à l'éclairage électrique, à l'élévation des eaux, dans des localités dépourvues de gaz. Il n'y avait là qu'un timide début, bientôt suivi d'un essor extraordinaire : pendant la période décennale de 1890-1900, les nouveaux moteurs ont reçu d'innombrables applications pour les travaux agricoles et surtout pour l'automobilisme. La locomobile à essence ou à pétrole, légère, exigeant un faible poids de combustible, ne demandant que peu d'eau, facile à conduire, toujours prête à être mise en marche, n'offrant aucun danger d'explosion, se prête admirablement aux usages agricoles. Quant à l'automobilisme, il a ouvert un immense champ d'action au moteur alimenté par les hydrocarbures liquides, en même temps qu'il lui était redevable de son développement inouï.

Jusqu'ici, ce sont les gazolines qui tiennent le premier rang. Généralement, les machines sont à explosion, à quatre temps et à simple effet; elles fonctionnent à grande vitesse, notamment pour l'automobilisme où elles accomplissent de 400 à 1,600 tours par minute. Bien qu'encore délaissé, le système des deux temps a ses partisans : il permet de remplacer les soupapes d'échappement par des lumières ouvertes dans les cylindres; les pompes à air qu'il rend indispensables fournissent le moyen d'augmenter la compression et de régler la marche par étranglement à l'admission.

Le carburateur est, en quelque sorte, le cœur de la machine. Sa fonction consiste à pulvériser l'essence et à en assurer le mélange intime avec l'air. Des procédés nombreux ont été imaginés pour la pul-

vérisation; elle est le plus souvent obtenue par giclage à travers un orifice étroit sous l'influence de la dépression que détermine l'aspiration du moteur; les carburateurs à léchage ou à barbotage rétrocedent devant les carburateurs à giclage, à distribution par alvéoles ou par compression d'une lentille manométrique. L'hiver, il peut être utile de réchauffer le carburateur en aspirant de l'air chaud ou en faisant circuler dans un double fond soit les gaz de l'échappement, soit l'eau de refroidissement.

Au début, les tubes de platine portés à l'incandescence étaient en faveur pour l'inflammation. Ils avaient le défaut de ne point permettre l'avance à l'allumage et de présenter des dangers d'incendie. Aussi leur a-t-on préféré les dispositifs électriques avec piles ou accumulateurs, malgré certains inconvénients comme la multiplicité des bobines et des conducteurs dans les machines à plusieurs cylindres, les courts-circuits, les décharges intempestives. La tendance actuelle est de s'affranchir des accumulateurs, en employant des magnétos à mouvement alternatif ou circulaire, qui fournissent l'étincelle par rupture de courant : cette étincelle doit autant que possible jaillir dans une cavité latérale greffée sur le cylindre.

Le problème de la régulation comporte diverses solutions, ainsi que je l'ai déjà indiqué pour les moteurs à gaz. Il appelle encore des recherches attentives. À ce sujet, un indicateur optique du diagramme des moteurs thermiques, récemment créé par MM. Hospitalier et Carpentier, mérite d'être particulièrement signalé.

Dans les machines d'automobiles, le refroidissement se fait par ailettes, avec ou sans ventilateur, avec ou sans circulation d'eau. La circulation est obtenue à l'aide d'un thermosiphon ou de petites pompes rotatives.

Peu à peu, les moteurs ont été allégés. On en a établi de 45 chevaux, pesant 4 kilogrammes par cheval.

Les gazolines d'une densité de 0.7 donnent plus de deux chevaux-heure par litre. D'une manière générale, les essences constituent un excellent combustible, n'encrassent ni les cylindres ni les soupapes et même les lubrifient. Elles sont malheureusement d'un prix trop élevé. Ce prix et les risques inhérents à la manipulation de liquides si

volatils ont poussé à l'emploi du pétrole lampant ou du naphte, au moins pour les usages agricoles. Le pétrole lampant se compose de produits distillant entre 150 et 275 degrés; il ne s'enflamme qu'au-dessus de 35 degrés. Son défaut est d'encrasser assez vite les moteurs, malgré la pulvérisation ou même la volatilisation; il se répandra quand on aura réussi à mieux assurer le fonctionnement et l'entretien des machines. Un chauffage est nécessaire; les gaz d'échappement y sont utilisés.

Parmi les inventions les plus remarquables de la fin du siècle se range celle du moteur Diesel à combustion. Ce moteur convient aux combustibles solides, liquides ou gazeux. Il est à quatre temps, mais avec modification du cycle classique. Afin de mieux préciser, considérons le cas où on emploie de l'huile de naphte. Au premier coup, le moteur aspire l'air atmosphérique; le second coup comprime cet air à 35 atmosphères et en élève ainsi la température à 600 degrés, c'est-à-dire au-dessus du point d'inflammation de l'huile; pendant le troisième coup, a lieu d'abord l'injection graduelle de l'huile au moyen d'un jet d'air comprimé à 45 atmosphères (pompe spéciale et accumulateur), cette huile s'enflamme et brûle progressivement, puis l'admission se ferme et les gaz opèrent leur détente; enfin le quatrième temps correspond à l'échappement. La machine a un rendement très fort, 25 à 27 p. 100; sa consommation en huile de pétrole ne dépasse pas 200 grammes par cheval-heure; le fonctionnement est presque aussi économique à demi-charge qu'à pleine charge. Dès aujourd'hui, il existe de nombreuses applications du moteur Diesel, surtout dans les pays où le pétrole se vend à bas prix; son adaptation aux automobiles peut être prévue pour le jour où il aura été allégé.

La propagation des moteurs à alcool servirait puissamment les intérêts de l'agriculture. Il y aurait là un grand progrès, à la réalisation duquel les pays producteurs d'alcool consacrent leurs efforts persévérants. Au point de vue technique, la plupart des moteurs à essence s'accommodent parfaitement de l'alcool, sauf quelques légères modifications aux carburateurs et aux prises d'air; il suffit de faire la carburation à chaud, pour volatiliser entièrement le liquide et favoriser son mélange intime à l'air; cette précaution, jointe à une compression

énergique, assure l'entière combustion; la vapeur d'eau qui se dégage ne préjudicie pas au bon fonctionnement et le favorise même, pourvu que la température soit assez élevée et que la détente soit accentuée. Au point de vue de la dépense, l'alcool pur ne peut soutenir la lutte; mais il en est autrement de l'alcool carburé par l'addition de benzol.

§ 4. MOTEURS HYDRAULIQUES.

1. Généralités sur la force motrice hydraulique. — Malgré des recherches consciencieuses, nous manquons encore des données nécessaires pour une supputation quelque peu précise de la puissance que représentent les eaux tombant de nos montagnes à la mer. Certaines études locales dans la région des Alpes ont conduit à admettre des disponibilités utilisables atteignant en eaux moyennes 4 ou 5 millions de chevaux pour les départements alpins et 10 millions de chevaux pour l'ensemble de la France⁽¹⁾. Sans attribuer à de tels aperçus une portée dont ils ne sont pas susceptibles, on doit néanmoins reconnaître l'immensité des forces hydrauliques disséminées par la nature dans les diverses régions du territoire. Il y a là, suivant une expression pittoresque, d'admirables réserves de «houille blanche», que renouvelle incessamment la condensation des nuages formés au-dessus des océans sous l'action de la chaleur solaire. L'énergie ainsi mise à la disposition de l'homme par le cycle ininterrompu des phénomènes atmosphériques a le précieux avantage de s'offrir gratuitement et de n'éprouver qu'un déchet minime en traversant les appareils destinés à la recueillir : tandis que le rendement des meilleures machines à vapeur atteint seulement 15 p. 100 et celui des moteurs à gaz les plus perfectionnés 30 à 34 p. 100, les turbines modernes rendent de 80 à 90 p. 100.

Cependant, jusqu'ici, la France n'a tiré parti que d'une faible fraction de la puissance disponible; le surplus se perd en tourbillonnements stériles ou se dépense en ravages dans le lit et sur les rives des cours d'eau. D'après une statistique publiée en 1901 par l'Office du travail et relative à l'année 1899, le nombre des chutes aménagées était de 50,474; celui des établissements en exploitation, de 47,892; la puissance nominale de ces établissements, de 574,972

⁽¹⁾ Comme terme de comparaison, je rappelle que la statistique du Ministère des travaux publics, pour l'année 1900, évalue à 1,790,000 chevaux environ la puissance des

appareils à vapeur employés par l'agriculture et l'industrie, non compris les chemins de fer et la navigation, et à 5,740,000 chevaux celle des locomotives.

chevaux. En tête de la liste des départements classés par ordre de puissance se plaçaient l'Isère (37,166 chevaux), la Savoie (30,985), les Basses-Pyrénées (22,029), la Haute-Savoie (21,290), les Hautes-Pyrénées (18,775), les Vosges (16,689), le Tarn (14,893), le Jura (13,935), le Doubs (13,300), la Haute-Garonne (11,498), le Lot-et-Garonne (11,262), la Haute-Loire (10,467). La proportion numérique des établissements selon l'importance de leur force motrice se chiffrait ainsi : de 1 à 10 chevaux, 772.2 p. 1,000; de 11 à 50 chevaux, 203.6; de 51 à 100 chevaux, 15.3; de 101 à 200 chevaux, 5.6; de 201 à 500 chevaux, 2.4; de 501 à 1,000 chevaux, 0.4; au-dessus de 1,000 chevaux, 0.5. Il n'existait que 26 établissements dotés d'une puissance supérieure à 1,000 chevaux; deux usines de la Savoie dépassaient 5,000 chevaux, l'une avec 9,266 chevaux et l'autre avec 10,770. Dans l'ensemble, la puissance moyenne était de 12 chevaux. Les moulins et les scieries constituaient de beaucoup la majeure partie des exploitations.

En remontant à un passé plus lointain, dans les limites du siècle, on eût constaté une situation bien plus mauvaise encore, rencontré presque exclusivement de petites usines, pourvues d'un outillage défectueux et ne disposant que d'une puissance très restreinte.

Diverses causes empêchaient l'essor des installations hydrauliques. C'était d'abord l'irrégularité du régime des cours d'eau, les variations de débit et de chute dues aux sécheresses ou aux crues, les chômages imposés par les hautes eaux ou les gelées. Souvent aussi, l'éloignement des centres de population créait un obstacle insurmontable pour les usines dont le fonctionnement eût exigé un nombreux personnel ouvrier. Il n'était pas rare non plus que les intéressés reculassent, en dépit des économies futures d'exploitation, devant des dépenses élevées de construction. Enfin les projets d'aménagement de chutes nouvelles se heurtaient trop fréquemment contre des oppositions violentes, soit de la part des riverains, soit de la part des usiniers déjà établis sur la même rivière.

À la vérité, les conquêtes de la science, les progrès des moteurs hydrauliques, la poussée industrielle, exerçaient peu à peu leur influence salutaire. Mais la stérilité des forces naturelles ne s'atténuait qu'avec

une lenteur désespérante quand l'électricité est venue, vers la fin du siècle, ouvrir la voie à une véritable révolution. Cette révolution, encore à ses débuts, apparaît pleine de promesses pour l'avenir.

Parmi les bienfaits de l'électricité, l'un des plus précieux est d'avoir rompu le lien qui maintenait dans un contact étroit la production et l'emploi de la force. De simples fils métalliques, d'un diamètre de quelques millimètres, peuvent transporter l'énergie, sans déchet notable, à 100 ou 200 kilomètres, et les découvertes nouvelles ne tarderont certainement pas à reculer ces limites. Rien n'empêche, dès lors, de placer loin de la chute, au point le plus convenable, l'usine où sera utilisée la puissance recueillie par les moteurs hydrauliques, de répartir cette puissance entre plusieurs centres de consommation, de la distribuer sur de vastes étendues sous forme de lumière ou de force motrice, de s'en servir commodément pour l'éclairage public ou privé, pour la traction des chemins de fer et des tramways, pour le travail à domicile.

En même temps qu'elle apportait aux forces hydrauliques la faculté de transport à d'énormes distances, l'électricité leur ouvrait des débouchés inattendus. On sait les merveilles déjà accomplies par l'électro-chimie et l'électro-métallurgie, les admirables résultats obtenus à l'aide des fours électriques dans le traitement des matières aux températures les plus élevées. Des usines gigantesques se sont créées notamment pour la fabrication du carbure de calcium, de la soude, des chlorates alcalins, de l'aluminium, et nous ne sommes qu'à l'aurore d'une transformation profonde des industries chimiques et métallurgiques. La force motrice électrique, si souple, si maniable, si docile, envahira de plus en plus le domaine des opérations mécaniques. Si le gaz lutte vaillamment contre l'éclairage par l'électricité ou par l'acétylène, il n'en subit pas moins des défaites successives. Partout, l'usage de la traction électrique sur les chemins de fer entre dans le champ des réalités et la solution générale du problème est envisagée comme relativement prochaine. L'automobilisme naissant deviendra aussi un fief de l'électricité, quand l'asservissement plus complet des eaux aura multiplié les stations de chargement ou les dépôts d'accumulateurs de rechange.

Par une inéluctable évolution, les modestes établissements hydrauliques d'antan tendent à disparaître pour faire place à des établissements de grande puissance. Ici comme ailleurs, il faut obéir à la loi générale de concentration. Le rapport de M. Firminhac concernant la classe des machines motrices diverses à l'Exposition de 1900 énumère 14 usines hydrauliques françaises de 5,000 à 12,000 chevaux. En Suisse, le chiffre de 15,000 chevaux est atteint; au Canada, celui de 16,000. Dès aujourd'hui, les États-Unis ont, aux chutes du Niagara, 160,000 chevaux répartis en deux usines, l'une de 110,000 chevaux, l'autre de 50,000; ils utilisent sur place la majeure partie de cette force motrice et emploient l'excédent en des points plus ou moins éloignés, notamment à Buffalo (30 kilomètres) pour l'éclairage, la traction des tramways, etc. Sur la rive canadienne du Niagara s'élèvent des usines, dont une atteindra 120,000 chevaux; l'énergie servira à la consommation industrielle locale ou sera envoyée au loin, peut-être jusqu'à Toronto (120 kilomètres). On aborde, d'un seul jet, des chutes mesurant plusieurs centaines de mètres; il en est une de 950 mètres, pour laquelle un mètre cube de débit par seconde donne une énergie brute de 12,590 chevaux. Cette forme d'utilisation de la pente des eaux réduit au minimum les dimensions des moteurs hydrauliques et leur imprime une vitesse vertigineuse.

Les pouvoirs publics se préoccupent, d'ailleurs, d'édicter les dispositions législatives nécessaires pour favoriser des entreprises éminemment fécondes et utiles à la prospérité du pays.

Un jour viendra où l'augmentation continue des besoins de force conduira l'homme à se tourner vers la mer, à recueillir la puissance formidable des marées et à l'utiliser sur place ou à la transporter au centre des continents.

Ces brèves considérations montrent suffisamment la grandeur du rôle réservé aux moteurs hydrauliques.

2. Roues et turbines. — Autrefois, l'usage était de distinguer les roues hydrauliques à axe horizontal et les roues à axe vertical, communément désignées sous le nom de turbines. Cette classification ne saurait être maintenue : les turbines ont souvent, en effet, leur axe

horizontal. Une distinction plus rationnelle est celle qui se fonde sur le mode d'action de l'eau : la masse liquide agit tantôt par son choc, tantôt par son poids, tantôt par sa réaction sur des surfaces le long desquelles elle se meut.

Les moteurs hydrauliques le plus généralement employés ont été pendant longtemps des moteurs à axe horizontal, dans lesquels l'eau agissait surtout par son choc, par son poids ou par la réunion de ces deux facteurs : roues en dessous à palettes planes, emboîtées dans un coursier; roues pendantes; roues flottantes de Colladon; roues de côté à aubes ou à palettes, emboîtées dans un coursier circulaire, et roues-vannes Sagebien; roues à augets de côté; roues à augets en dessus.

Ce fut seulement au XVIII^e siècle que les études théoriques ou les recherches expérimentales de Parent, Borda, Smeaton et Bossut commencèrent à éclairer de quelque jour les principes mécaniques et par suite les règles de construction des roues hydrauliques. Après 1800, plusieurs savants, notamment Morin, Poncelet, d'Aubusson, Bélanger, reprirent le problème et en poussèrent beaucoup plus loin la solution. Le général Poncelet, frappé des vices de la roue en dessous à palettes planes, la modifia de manière à assurer autant que possible l'entrée de l'eau sans choc et sa sortie sans vitesse; il créa ainsi, en 1823, la roue à aubes courbes qui a gardé son nom; ce moteur, proche parent des turbines, peut être considéré comme l'ancêtre de la roue-turbine américaine Pelton.

Le règne des anciennes roues est fini. Elles sont supplantées par les turbines. À peine représentées aux Expositions de 1878 et de 1889, elles ont cessé de l'être en 1900. Cependant leurs longs et excellents services méritaient un souvenir historique.

Dans les turbines, l'eau, au lieu d'agir par son choc et par son poids, agit principalement par sa réaction sur des surfaces invariablement fixées à l'appareil et le long desquelles elle se meut. Quoique connu depuis un assez long délai, ce système de moteurs est resté peu répandu jusqu'au jour où d'habiles ingénieurs l'ont doté des améliorations nécessaires pour que son rendement fût comparable à celui

des roues en dessus et des bonnes roues de côté. Telles que nous les connaissons aujourd'hui, les turbines offrent de sérieux avantages pratiques. Elles s'accommodent de chutes beaucoup plus élevées que les anciennes roues à axe horizontal, ce qui ne les empêche pas d'être également appropriées aux petites chutes. Leur souplesse à l'égard du volume de l'eau n'est pas moindre. Capables en général de recevoir la masse liquide sur toute leur circonférence, elles peuvent avoir un fort débit sous des dimensions très restreintes. Moyennant des dispositions convenables, les variations de ce débit et celles des niveaux d'amont ou d'aval n'altèrent le rendement que dans une faible mesure. La grande vitesse de rotation permet de simplifier et d'alléger les organes destinés à transmettre le travail. Enfin l'influence destructive des crues et des gelées est bien moins redoutable que pour les anciennes roues à axe horizontal, qui fonctionnent presque entièrement hors d'eau.

La généalogie des turbines actuelles remonte aux roues à cuillers et aux roues à cuve. Dès le ^{xviii}^e siècle, elles firent l'objet de travaux remarquables dus à Bernouilli, à Segner, à Euler, à Borda. Segner inventa, en 1750, une roue fondée sur le principe du tourniquet hydraulique; quatre ans plus tard, Euler imaginait les turbines parallèles. Vers le début du siècle, Mannoury Dutot proposa son «levier hydraulique» (1807). Puis la théorie se compléta, grâce à Burdin, Combes, Poncelet, Redtenbacher, etc. En 1832, Fourneyron, appliquant les idées de son maître Burdin, construisit l'admirable turbine centrifuge qui porte son nom. Presque à la même date, Jonval faisait breveter sa turbine parallèle avec tube de succion, bientôt perfectionnée par Kœchlin. De son côté, Fontaine créait, en 1839, la célèbre turbine parallèle, dont plusieurs spécimens figurèrent encore au Champ de Mars lors de notre dernière Exposition universelle. C. Callon et D. Girard eurent l'idée de laisser la veine liquide sortant des cloisons directrices s'épanouir librement au contact de l'air dans les canaux mobiles, et de cette idée naquit la «libre déviation»; D. Girard fut aussi l'auteur de l'hydropneumatisation, qui consistait à placer la roue sous une sorte de cloche à plongeur, afin d'en éviter l'immersion dans l'eau du bief inférieur; l'hydropneumatisation se rattachait étroi-

tement à la question du vannage partiel, qui règle le débit et la puissance des turbines en couvrant ou découvrant un nombre plus ou moins grand d'orifices, mais en laissant chacun d'eux entièrement ouvert ou fermé, au lieu d'étrangler plus ou moins l'ensemble des orifices adducteurs. Ainsi étaient arrêtés, dans leurs traits essentiels, les types de turbines à axe vertical qui allaient se propager rapidement en Europe : turbines centrifuges (Fourneyron, P. Callon, Canson, Cadiat, etc.); turbines parallèles (Fontaine, Jonval-Kœchlin, Girard, etc.).

Aux turbines à axe vertical s'ajoutaient quelques turbines à axe horizontal. La position de l'axe n'amène du reste aucun changement essentiel ni dans la théorie du moteur, ni même dans ses dispositions principales ; elle ne constitue en quelque sorte qu'un accident d'importance secondaire. Certaines raisons peuvent faire préférer l'horizontalité de l'axe, par exemple le désir de simplifier les organes de transmission, la possibilité d'accroître économiquement et commodément le diamètre pour réduire le nombre de tours par minute, l'avantage de la suppression du pivot plus difficile à entretenir que des tourillons. Parmi les turbines à axe horizontal qui jouirent de quelque faveur en France, il y a lieu de citer les roues-turbines de D. Girard et la roue-hélice ou turbine sans directrices du même ingénieur.

Tandis que l'Europe multipliait les turbines centrifuges ou parallèles, les États-Unis produisaient des modèles différents. En 1849, Francis construisit une turbine centripète, dans laquelle l'eau abordait le moteur par la circonférence et le quittait vers le centre, c'est-à-dire avec le minimum de vitesse résiduelle, condition favorable au rendement. Puis vinrent les turbines mixtes, où l'eau, après avoir agi suivant une direction radiale et centripète, était évacuée parallèlement à l'axe de rotation. Des expériences retentissantes, faites à l'Exposition de Philadelphie (1876), fixèrent l'attention publique ; elles accusèrent, pour la turbine Risdon, un rendement de 87 p. 100 en pleine admission. Continuant leurs recherches dans la même voie, les Américains imaginèrent toute une série de types remarquables, entre autres le type Hercule, dont le rendement, fort élevé, variait très peu avec le degré d'admission.

Frappés du mérite des turbines centripètes américaines, MM. Singrün d'Épinal les introduisirent chez nous en 1885 et, à partir de 1890, les applications de ces moteurs devinrent extrêmement nombreuses en France. Nos constructeurs ne se bornèrent pas à imiter; ils réalisèrent d'utiles perfectionnements et organisèrent des ateliers de fabrication largement approvisionnés.

La Suisse, de son côté, s'attachait au système Francis et l'améliorait. Pour les hautes pressions, elle portait son choix sur la turbine Girard à admission partielle et sur des roues-turbines tangentielles, dérivant de la roue américaine Pelton. Son activité s'étendait spécialement aux régulateurs automatiques de vitesse et trouvait des dispositifs extrêmement précis, mais un peu coûteux. De ses usines sortirent des moteurs dont la puissance dépassait 5,000 chevaux. Les ingénieurs suisses acquirent un renom si universel et si légitime, que les turbines monstres utilisant les chutes du Niagara furent établies d'après leurs dessins et leurs indications.

À l'Exposition de 1900, les turbines centripètes dominaient : turbines centripètes pures; turbines centripètes demi-mixtes, évacuant l'eau sous un angle de 45 degrés par rapport à l'axe de rotation; turbines centripètes mixtes. Pour une force et une chute déterminées, la hauteur du distributeur et de la roue mobile augmente, la vitesse s'accroît, le diamètre et l'encombrement diminuent, quand on passe du type pur au type demi-mixte, puis au type mixte. D'une manière générale, les turbines centripètes conviennent surtout aux basses et moyennes chutes; leur grande vitesse, leur régularité, la facilité de leur accouplement aux dynamos les rendent particulièrement aptes à la commande des machines génératrices d'électricité; elles donnent, en principe, un rendement supérieur à celui des turbines parallèles ou centrifuges. La réduction et l'accroissement naturels de l'admission par l'effet de la force centrifuge, selon que la vitesse s'élève ou s'abaisse, déterminent une autorégularisation en beaucoup de cas suffisante. Bien qu'ayant le plus souvent leur axe vertical, les turbines centripètes se font également à axe horizontal.

On voyait aussi dans les galeries de 1900 des spécimens nom-

breux de turbines tangentielles pour hautes chutes et débits restreints. Ces moteurs à axe horizontal remplacent avantageusement les turbines qui admettent l'eau sur la totalité ou une grande partie de leur circonférence et dont les dimensions seraient trop restreintes, en même temps que la vitesse de rotation excessive. Quelques-uns se rattachaient au système Girard ; la plupart relevaient du système Pelton. La roue-turbine Pelton a des aûgets de forme conchoïde double ; amenée tangentiellement à la circonférence par un ou plusieurs ajutages, l'eau sort dans une direction sensiblement opposée à la première ; le rendement effectif atteint 75 à 80 p. 100.

Enfin l'Exposition comprenait des turbines centrifuges ou parallèles de construction classique.

Une grande régularité de marche s'impose pour beaucoup d'installations, en particulier pour les commandes de générateurs d'électricité. Aussi les régulateurs automatiques de vitesse abondaient-ils à l'Exposition. Ces appareils sont de deux catégories : régulateurs agissant sur le vannage d'admission de l'eau ; régulateurs-freins absorbant l'excédent de force du moteur.

Les régulateurs de la première catégorie se divisent eux-mêmes en régulateurs à action purement mécanique, régulateurs hydrauliques et régulateurs hydro-mécaniques. Sûrs et puissants, les régulateurs mécaniques agissent avec une certaine lenteur et ont, en outre, le défaut d'user rapidement les organes obturateurs, s'ils sont sensibles. Les régulateurs hydrauliques exercent une action plus rapide et peuvent être doués de toute la sensibilité désirable, mais coûtent cher, nécessitent fréquemment le secours d'une pression artificielle et par suite l'adjonction d'une pompe accessoire, enfin courent des risques à l'époque des gelées. Quant aux régulateurs hydro-mécaniques, ils participent des avantages et des inconvénients du système purement mécanique et du système à servo-moteur hydraulique.

Généralement très sensibles, les régulateurs-freins laissent le débit constant, quelle que soit la force utile demandée au moteur, et ne peuvent dès lors être rationnellement employés, quand l'économie d'eau s'impose. Leur volume et leur prix en limitent d'ailleurs l'usage.

3. **Machines à colonne d'eau ou à pression d'eau.** — Les machines à colonne d'eau agissent en quelque sorte comme des pompes renversées. On peut aussi les assimiler à des machines à vapeur qui fonctionneraient sans détente ni condensation et où la vapeur serait remplacée par un égal volume d'eau sous la même pression. Inventées dans la première moitié du XVIII^e siècle, elles ne prirent un caractère réellement pratique que beaucoup plus tard, grâce aux perfectionnements réalisés par l'ingénieur bavarois G. von Reichenbach (1808), notamment à ceux du mode de distribution.

Au début, les machines à colonne d'eau étaient presque exclusivement utilisées pour l'épuisement des mines. Depuis le milieu du siècle, leur domaine a pris une extension remarquable. Le mérite en revient surtout à sir William Armstrong, qui commença, dès 1846, à répandre l'emploi de ces machines dans les mines métalliques du nord de l'Angleterre, non seulement pour faire mouvoir des pompes, mais aussi pour extraire les minerais et pour commander des ateliers de préparation mécanique. Un spécimen de machine à colonne d'eau et à rotation d'Armstrong parut à l'Exposition universelle de 1851.

Primitivement, Armstrong tirait parti des chutes naturelles, de la pression d'eau des canalisations urbaines ; au besoin, il créait des réservoirs élevés et les alimentait par une machine à vapeur. Bientôt, il suivit une voie différente, en appliquant dans une large mesure le principe de la presse hydraulique.

Cet outil merveilleux de simplicité et de puissance, inventé, dit-on, par Pascal, est devenu industriel le jour où le cuir embouti de Bramah a permis de tenir étanche le joint du piston. Il peut être aisément manœuvré par l'homme : la main de l'ouvrier, agissant sur la pompe de pression, parcourt un chemin considérable en exerçant un faible effort ; le travail ainsi développé se transmet par l'eau au piston de la presse ; celui-ci, à l'inverse du piston de la pompe, ne parcourt qu'un très petit espace, mais exerce un grand effort. Quand une usine a de nombreuses pressées à faire, ce qui est le cas des huileries, des fabriques de bougies, etc., le service est assuré au moyen d'une série de presses hydrauliques mises en relation, par des conduites, avec une batterie de pompes foulantes qu'actionne la vapeur ; une

simple manœuvre de robinet fait agir chaque presse au moment voulu.

Armstrong avait déjà imaginé la substitution des manœuvres hydrauliques aux manœuvres à bras ou à vapeur pour les appareils de chargement et de déchargement dans les ports, les docks, les gares de chemins de fer ; il s'était proposé de réduire ainsi la main-d'œuvre, de diminuer le personnel, de supprimer les nombreuses machines à vapeur qui devaient être maintenues en feu d'une manière permanente et qui, souvent, présentaient de graves dangers d'incendie. Désireux de donner à ses projets toute la portée possible, l'illustre ingénieur eut recours à la compression artificielle de l'eau, ce qui lui permit d'aborder des charges de 400, 500, 1,000 mètres, et de restreindre les dimensions des machines aussi bien que des conduites ; le trait caractéristique de son œuvre fut, d'ailleurs, l'invention des accumulateurs, véritables réservoirs de force motrice interposés entre l'usine produisant cette force et les canalisations distributrices. Ces accumulateurs sont des presses portant une énorme charge, où l'eau est comprimée et emmagasinée pour se dépenser suivant les besoins de la manutention ; il suffit d'une machine à vapeur de faible puissance, capable seulement de subvenir au travail moyen réparti sur une longue durée.

Les usages de l'eau sous pression offrent une extrême diversité : levage des fardeaux ; ouverture et fermeture des portes d'écluse ; manœuvre des ponts tournants ou des plaques tournantes ; halage des navires sur cales sèches ; service des grosses bouches à feu, des tourelles de défense, des convertisseurs Bessemer, des aiguilles ou signaux de chemins de fer ; travaux d'imprimerie, de calandrage, d'huilerie, de broyage, de mouture, de scierie ; forgeage, emboutissage, rivure ; distribution de force à domicile ; fonctionnement des ascenseurs ; etc. Il en résulte beaucoup de variété dans les récepteurs utilisant l'eau comprimée.

Parmi ces récepteurs, certains sont à action directe et consistent en des presses hydrauliques ordinaires. D'autres agissent par l'intermédiaire d'une chaîne passant sur des moufles ; d'autres encore constituent des appareils à rotation continue. La plupart des appareils de rotation se rattachent à trois types : 1° un seul cylindre à double

effet; 2° deux cylindres conjugués à double effet, ayant leurs manivelles à angle droit; 3° trois cylindres conjugués à simple effet, ayant leurs manivelles à 120 degrés. Ce dernier type est celui auquel paraissent avoir été acquises les préférences définitives d'Armstrong.

À côté de leurs précieuses propriétés, les moteurs à colonne d'eau ont quelques défauts. Leur prix est élevé. Sous les climats rigoureux, la gelée expose à des interruptions de marche et à des accidents. Des précautions minutieuses doivent être prises contre les fuites. Enfin et surtout, la puissance motrice est souvent gaspillée; car, pour chaque coup de piston, la dépense d'eau comprimée reste indépendante de la résistance. Les constructeurs se sont ingénies à trouver des dispositifs qui proportionnent au moins approximativement la consommation d'énergie à l'effort utile. Un artifice élémentaire consiste à grossir la tige du piston et à introduire l'eau soit sur la face libre de cet organe, soit à la fois sur les deux faces, selon qu'on veut obtenir une grande ou une faible puissance; pour les machines de rotation, M. Samain montrait en 1889 une solution intéressante.

Des progrès notables ont été accomplis au point de vue de la légèreté des machines à pression d'eau; on est parvenu à les rendre très mobiles, ce qui en facilite l'emploi et en multiplie les applications (grues hydrauliques roulantes, riveuses hydrauliques portatives). Cependant l'eau comprimée a aujourd'hui un concurrent redoutable dans l'électricité.

§ 5. MOULINS À VENT.

MOTEURS À AIR COMPRIMÉ OU RARÉFIÉ.

1. *Moulins à vent.* — Pendant longtemps, les moulins à vent ont rendu de grands services dans les pays où les chutes d'eau faisaient défaut. Aujourd'hui, la concentration de la mouture du blé dans de puissantes minoteries et les ressources offertes par la vapeur amoindrissent singulièrement leur rôle, qui se limite de plus en plus à l'élévation des eaux.

Il convient néanmoins de rappeler très brièvement les modifications apportées à ces moteurs, au cours du xix^e siècle. On est arrivé à construire des appareils tout à fait différents de leurs devanciers, légers, simples, présentant les facilités voulues de manœuvre et d'orientation, pourvus des dispositifs nécessaires pour proportionner la surface active des ailes à la puissance du vent; la tour est supprimée et remplacée par un échafaudage beaucoup moins lourd; les ailes tournent au moindre souffle et sont armées d'un mécanisme de réglage, presque toujours automatique, qui agit soit en modifiant la surface ou l'inclinaison des toiles, soit en changeant l'orientation même du moulin. Un autre progrès, qui distingue les installations des États-Unis, est le remplacement des quatre ou six ailes classiques par une multitude de petites ailes droites, occupant à peu près toute l'aire du cercle que décrivent les bras. Quelques constructeurs établissent de véritables turbines atmosphériques entièrement en métal.

Voulant éviter l'orientation des appareils à chaque changement dans la direction du vent, les ingénieurs avaient imaginé, dès la fin du xvii^e siècle, de faire tourner les ailes horizontalement autour d'un axe vertical : ces ailes ne pouvaient plus être symétriques par rapport à l'axe et devaient se déployer d'un côté, puis se reposer du côté opposé. Les appareils ainsi conçus portent la dénomination de panémones, pananémones, pantanémones. Ils ont donné lieu à de nombreuses variantes, se caractérisant surtout par les procédés mis en œuvre pour exposer et soustraire alternativement les ailes à l'action

du vent. Les panémons sont nécessairement volumineux, lourds et coûteux, puisqu'une assez faible partie des ailes est seule active : aussi sont-ils délaissés.

2. Machines à air comprimé ou raréfié. — Les moulins à vent se bornent à utiliser l'énergie fournie naturellement par l'air. Mais on peut concevoir qu'un premier moteur ait été employé à comprimer de l'air et que cet air ainsi comprimé serve ensuite à actionner un récepteur. Au point de vue mécanique, la combinaison paraît d'abord peu avantageuse ; cependant il est des cas où la facilité d'usage compense et au delà le moindre rendement théorique. En fait, grâce à son élasticité presque indéfinie, à sa faible densité, au peu de résistance qu'il éprouve en parcourant les conduites, l'air est un précieux agent de transmission de la force. Papin avait déjà proposé de recourir à ce véhicule du travail : des difficultés pratiques, telles que le défaut d'étanchéité des joints, les variations étendues de température déterminées par la compression et la détente, les pertes notables d'effet utile dues à ces variations, s'opposèrent longtemps à la réalisation d'une idée si simple. Ces difficultés n'ont été définitivement vaincues que dans la seconde moitié du XIX^e siècle. Depuis, l'air comprimé a reçu d'innombrables applications : mise en mouvement des perforatrices pour le percement des souterrains ; ouverture des galeries, ventilation, traction mécanique, extraction, épuisement, remonte des déblais, etc., dans l'exploitation des mines ; manœuvre des freins de wagons ; télégraphie pneumatique ; distribution de l'heure ; traction sur certaines lignes de chemins de fer ou de tramways ; propulsion des torpilles ; commande de machines-outils ; etc. Paris est doté d'un réseau de conduites d'air comprimé, qui ne mesurait pas moins de 160 kilomètres en 1900 et dont les ramifications provisoires dans l'enceinte de l'Exposition avaient, en outre, un développement de 4 kilomètres.

Deux noms dominent l'histoire des progrès accomplis depuis cinquante ans : ceux de Colladon et de Sommeiller. Les recherches de Colladon ont puissamment contribué au succès des percements gigantesques pratiqués à travers les Alpes ; on lui doit, pour une large part, les moyens mis en œuvre afin de combattre l'échauffement ou

le refroidissement de l'air. Sommeiller a créé presque de toutes pièces les instruments des magnifiques chantiers de Fréjus.

Après bien des essais sur les compresseurs à sec jusqu'alors utilisés dans le fonçage des puits et les fondations, Sommeiller eut la pensée de produire l'air comprimé au moyen d'un appareil à piston hydraulique qui porte son nom et dont le principe avait été antérieurement indiqué par l'ingénieur français Sorel (1841) : cet appareil se compose de deux colonnes cylindriques que relie un cylindre horizontal de même diamètre, où circule un piston noyé ; le mouvement du piston abaisse et élève alternativement dans les colonnes une nappe d'eau qui aspire et comprime l'air. Le compresseur de Sommeiller ne pouvait marcher qu'à faible vitesse : M. François réduisit le volume des colonnes, puis Colladon revint au compresseur à sec, en refroidissant l'air pendant la compression par une circulation d'eau autour du cylindre et par l'injection d'eau pulvérisée à l'intérieur. Presque tous les appareils construits dans la suite ont été plus ou moins des dérivés du compresseur Colladon, avec injection d'eau dans le cylindre. Néanmoins des dissidents se sont attachés à reprendre et à perfectionner, en augmentant la vitesse, le système à piston hydraulique.

La transmission et la distribution du travail n'exigent que des pressions modérées, généralement comprises entre 4 et 8 kilogrammes. Mais l'emmagasinement de l'air comprimé dans les réservoirs se fait sous des pressions beaucoup plus élevées : 50 kilogrammes, par exemple, pour l'alimentation des locomotives ; 100 et 150 kilogrammes pour le chargement des torpilles. M. Mékarski a même obtenu industriellement de l'air comprimé à plus de 1,000 kilogrammes. On atteint ces hautes pressions par le système compound ; l'air est successivement comprimé dans deux, trois ou quatre cylindres de dimensions décroissantes, munis de réservoirs intermédiaires.

Quant aux appareils récepteurs, ils sont ordinairement construits sur le même plan général que les moteurs à vapeur. En effet, si on laisse de côté la condensation, l'air peut être complètement assimilé à la vapeur, pour la détente, pour les artifices de distribution, pour les grandes vitesses d'écoulement ; il n'appelle que certains change-

ments de détail. Dans les grands moteurs, le froid intense résultant de la détente constitue un obstacle sérieux à la bonne utilisation de l'air comprimé; il faut y pourvoir par des procédés tels que la saturation de l'air en vapeur d'eau ou son passage à l'intérieur d'un calorifère réchauffeur.

Dans quelques cas, au lieu de transmettre le travail par l'air comprimé, on a préféré recourir à l'air raréfié. Ce mode de transmission peut offrir des avantages pour l'envoi de petites forces à domicile dans un rayon peu étendu. Son caractère exceptionnel me dispense d'y insister ici.

§ 6. APPAREILS DIVERS DE LA MÉCANIQUE GÉNÉRALE.

1. Transmission du travail. — 1. *Transmission mécanique du travail.*

— Les moteurs de l'industrie sont ordinairement établis en vue d'actionner des machines-outils, cette expression étant prise dans son sens le plus général. Parfois, le moteur et la machine-outil se trouvent réunis, de manière à ne constituer qu'un seul appareil; mais, dans la plupart des cas, il faut recourir à des organes de transmission, qui prennent le mouvement sur l'arbre du moteur et le transmettent soit à une, soit à plusieurs machines-outils. Cette transmission peut être faite à petite ou à grande distance.

Pour la *transmission à petite distance*, le système funiculaire joue un rôle de première importance. Si on pénètre, par exemple, dans un grand atelier, on y voit habituellement un arbre horizontal régnant sur toute la longueur, reposant sur des chaises par l'intermédiaire de coussinets, armé de poulies en nombre souvent considérable et animé d'un mouvement continu de rotation qu'il emprunte à un moteur central; sur chacune des poulies est jeté un lien flexible qui actionne une poulie parallèle adaptée à l'outil. Ce système simple, rustique, peu coûteux, convient particulièrement lorsque les rapports de vitesse entre les organes accouplés n'exigent pas une rigueur absolue.

Au premier rang des liens flexibles se placent les courroies de cuir, que les Anglais employaient dès la fin du XVIII^e siècle dans leurs filatures de coton et dont le domaine n'a cessé de s'étendre.

Pour éviter le glissement de la courroie sur la poulie, il faut lui donner une certaine tension. Mais les tensions prononcées engendrent des frottements et des pertes de travail, font gripper les coussinets, faussent les arbres. On a remédié à cet inconvénient par une augmentation progressive de la vitesse des courroies : plus la vitesse est grande, en effet, plus la tension peut être réduite pour une même puissance. Du reste, les transmissions rapides gagnent en légèreté, en économie, en facilité de montage et d'entretien.

La transmission par courroies n'a été, pendant fort longtemps, appliquée qu'aux petites puissances. Il en est autrement aujourd'hui;

M. Michel Lévy cite une courroie capable de transmettre 2,000 chevaux.

Des machines rapides comme les dynamos ne peuvent guère être conduites autrement que par courroies : c'est en grande partie à l'emploi de plus en plus répandu de ces machines que sont dus les récents progrès de la fabrication, les derniers perfectionnements dans la réunion des bandes élémentaires par couture, collage, rivure, etc. Les courroies puissantes se composent de lames superposées ou placées de champ et juxtaposées : telle d'entre elles représente la dépouille de 300 bœufs.

Il existe d'autres espèces de liens flexibles. Les courroies sont faites non seulement en cuir, mais aussi en coton, en chanvre, en balata, en crin, en poil de chameau, en fils d'acier tissés, etc. ; du caoutchouc et divers enduits imprègnent au besoin les tissus employés à leur confection. On se sert aussi de câbles sans fin en coton ou en chanvre, de câbles métalliques (F. Hirn, 1850), de chaînes avec poulies spéciales à saillies fournissant des points d'appui aux maillons.

Un dispositif intéressant, représenté à l'Exposition de 1878, consistait à réunir des tronçons d'arbres au moyen de joints universels et à créer ainsi de véritables arbres flexibles, permettant de transmettre la force dans toutes les directions. Vers la même époque, Stow indiquait une solution différente, mais très complète, de ce problème, par l'emploi d'un simple câble métallique tournant à grande vitesse.

Les seuls appareils rigides de transmission à petite distance qui appellent ici de courtes indications sont les engrenages. Ils assurent l'invariabilité parfaite des rapports de vitesse et se prêtent aux efforts les plus considérables. L'œuvre du siècle a été d'introduire la précision dans leur taille, de créer à cet effet des machines-outils automatiques, d'améliorer le métal dont ils sont faits. Malgré tout, le travail prolongé détermine inévitablement une certaine usure et par suite un certain jeu ; des chocs se produisent, quelquefois des dislocations et des ruptures. Dans le but de prévenir les à-coups à l'instant où les dents viennent en prise, White avait imaginé ses engrenages hélicoïdaux, dont le premier modèle parut à l'Exposition française de 1801 : plus tard, sont venues les roues à chevron ou à denture croisée.

Peu de problèmes présentent autant d'intérêt que la *transmission à grande distance* et la répartition de la force motrice. En effet, produire l'énergie dans de grandes usines centrales, la transporter au loin, la distribuer comme l'eau ou le gaz, la mettre à domicile sous la main de l'ouvrier, c'est opérer une véritable révolution industrielle, c'est assurer la mise en valeur des immenses forces hydrauliques qui restent trop souvent stériles, c'est restaurer le travail en famille. On conçoit que la question ait passionné bien des chercheurs. Les moyens mécaniques ne pouvaient apporter qu'une solution partielle et limitée. Il serait injuste cependant de ne pas rappeler l'invention par F. Hirn, en 1850, des câbles télodynamiques, câbles métalliques sans fin roulant à grande vitesse sur des poulies et permettant d'envoyer des centaines de chevaux-vapeur à quelques kilomètres. Des applications fréquentes de ces câbles ont été faites en Alsace, en Suisse, en Russie, etc. ; ils utilisent parfaitement la force motrice, mais pèchent par défaut de souplesse et s'accommodent mal des variations brusques de résistance. L'eau comprimée, l'air comprimé ou raréfié et surtout l'électricité devaient conduire plus près du but.

Les *embrayages* ont pour but de supprimer ou de rétablir à volonté l'action du moteur sur les outils dont le travail n'est pas continu. Ils se distinguent suivant que leur fonctionnement a lieu avec ou sans arrêt de l'arbre moteur. Rien de plus simple, de plus facile à combiner que les embrayages au repos. Pour les embrayages en marche, au contraire, la création d'un dispositif satisfaisant offre de réelles difficultés, et pourtant emprunter à un arbre moteur la force motrice nécessaire à la commande d'une machine-outil, sans modifier la vitesse de cet arbre, puis supprimer de même la transmission, sont des nécessités de premier ordre dans beaucoup d'ateliers. La transition du repos au mouvement ou du mouvement au repos des organes embrayés doit être progressive ; sinon, les effets de l'inertie pourraient provoquer des réactions violentes et destructives. D'autre part, il est indispensable que l'appareil soit robuste, sûr, commode à manœuvrer. Les conditions requises deviennent plus malaisées à remplir au fur et à mesure qu'augmentent la vitesse et la puissance. De nombreux systèmes ont été imaginés ; la prédominance appartient aux embrayages

par friction, spécialement à l'embrayage par poulies folle et fixe, avec commande par courroie.

Fréquemment, les machines-outils comportent plusieurs allures de marche : de là les *transformateurs de vitesse*.

2. *Transmissions diverses du travail.* — La transmission mécanique proprement dite n'est pas le seul mode de transport du travail. Il faut y joindre le transport par réservoirs et le transport par canalisation.

De ces deux derniers modes, le premier s'applique à l'air comprimé, à l'eau surchauffée, à l'électricité. On emprisonne l'air comprimé sous forte pression dans des réservoirs résistants; on enferme l'eau chauffée à 200 degrés par une injection de vapeur dans des récipients solides et enveloppés de matières isolantes; on emmagasine l'électricité dans des accumulateurs. Les réservoirs d'énergie ainsi constitués s'expédient ensuite jusqu'au lieu d'emploi. Des circonstances spéciales se prêtent seules à ce procédé de transmission, nécessairement coûteux : il ne convient que pour de petites quantités d'énergie et de faibles distances.

Le transport par canalisation a une tout autre importance. Il emploie comme agents non seulement l'eau sous pression et l'air comprimé ou raréfié, dont j'ai déjà parlé, mais aussi les courants électriques, qui feront l'objet d'indications ultérieures, ainsi que l'eau chaude et la vapeur d'eau. Boston a inauguré, en décembre 1888, une canalisation d'eau surchauffée à 205 degrés, pour le double service du chauffage et de la force motrice : au point de vue mécanique, le principe est excellent; mais la circulation sous les voies publiques et dans les habitations d'énormes masses d'eau à température et pression élevées offre des dangers sérieux. La vapeur peut également fournir la force en même temps que la chaleur; toutefois elle ne se prête pas aux transports à très grande distance; si son emploi est commode et facile à régler, les inconvénients dus à la condensation dans les tuyaux et aux fuites sont considérables; en outre, la sécurité publique court les mêmes risques avec les canalisations de vapeur qu'avec les canalisations d'eau surchauffée.

Enfin les combustibles solides (bois, houille, coke, etc.), les com-

bustibles liquides (pétrole, alcool, etc.) et les combustibles gazeux (gaz d'éclairage, gaz pauvre, gaz des hauts fourneaux, gaz naturel, etc.) sont de puissants véhicules d'énergie.

2. Machines servant à la manœuvre des fardeaux. — 1. *Appareils de levage.* — Les appareils de levage, crics, vérins, poulies, moufles, cabestans, treuils, chèvres, grues, ponts roulants, bigues, machines à mâter, etc., se divisent en appareils à bras et en appareils mus par une puissance mécanique.

Ceux de la première catégorie étaient, pour la plupart, en usage dès les temps anciens ou, du moins, antérieurement à 1800. Le XIX^e siècle leur a, cependant, apporté des perfectionnements et des additions. On lui doit notamment : une large application des engrenages dans les treuils; l'invention de la chaîne de Galle (1832), l'amélioration de cette chaîne par Neustadt et son emploi pour la manœuvre des lourds fardeaux; la création des treuils à noix par Nepveu (1840); la fabrication des câbles en acier; l'introduction du vérin hydraulique dans le domaine de la pratique courante; la belle conception du palan différentiel de Weston (1861).

Mais la véritable œuvre du siècle a été l'adaptation des moteurs mécaniques aux engins de levage et par suite une énorme augmentation de la puissance de ces engins, une accélération considérable des opérations de chargement ou de déchargement, une utilisation beaucoup meilleure du matériel de transport et souvent du matériel des usines, ainsi que des espaces occupés.

L'énergie nécessaire est fournie aux appareils par la vapeur, l'eau comprimée ou l'électricité suivant les cas. Pour les appareils isolés, la vapeur s'impose : le moteur et sa chaudière font corps avec l'engin; des équipages de roues dentées ou de simples pistons à traction directe transmettent le mouvement. Quand les appareils, bien que multiples, sont très rapprochés les uns des autres comme sur un navire, on peut encore recourir à la vapeur, en la produisant au moyen d'un générateur unique et en la distribuant aux divers engins par une canalisation : la division des moteurs subsiste seule. Enfin, pour les ensembles d'appareils dispersés, l'énergie produite par une

usine centrale est répartie à l'aide de l'eau sous pression ou de l'électricité : l'eau sous pression, dont j'ai indiqué déjà les qualités et les défauts, a un mérite de premier ordre, son incompressibilité, qui en fait un frein merveilleux n'exigeant que la manœuvre d'un robinet; la transmission électrique se recommande par sa simplicité et sa souplesse.

Il existe une extrême variété de types d'appareils mécaniques. Leurs dispositions diffèrent suivant la nature et l'importance du service à assurer, suivant la forme sous laquelle l'énergie est utilisée, souvent aussi suivant les vues et les tendances personnelles du constructeur. Bien que le principe des engins soit élémentaire, les mécanismes destinés au déplacement vertical ou horizontal du fardeau, à l'orientation de la volée, à la translation de l'appareil s'il est mobile, prennent parfois une certaine complication et demandent de l'ingéniosité.

L'Exposition universelle de 1900 donnait une notion très nette de la diversité des combinaisons adoptées par les praticiens. Cinquante-deux appareils d'une puissance de 1,000 à 45,000 kilogrammes y étaient employés à la manutention. On voyait des spécimens de grues fixes, de grues roulantes, de chevalets, etc. La manœuvre se faisait tantôt à bras, tantôt mécaniquement par la vapeur, l'électricité, l'essence. Une grue Titan et un pont roulant de 25 tonnes, destinés au montage et au démontage des groupes électrogènes dans le palais de l'Électricité, étaient remarqués à juste titre par les visiteurs et les spécialistes; mon rapport administratif et technique sur l'Exposition contient la description de ces beaux engins et celle de trois grands appareils (25, 30 et 45 tonnes) établis au bord de la Seine.

Je viens de citer le chiffre de 45 tonnes. Il ne faudrait pas considérer ce chiffre comme marquant la limite de puissance des appareils de levage. L'Exposition avait reçu des vues de lève-blocs atteignant une puissance de 100 tonnes et servant à l'échouage des gros blocs artificiels dont sont faites les jetées de plusieurs ports maritimes. Dans les établissements de la Marine, on rencontre des engins encore plus robustes, allant à 160 tonnes.

Chaque jour, les progrès des constructions mécaniques ou navales

donnent naissance à des masses indivisibles d'un poids plus considérable et entraînent une augmentation corrélative dans la force des engins de manutention. La tendance contemporaine est au gigantesque.

2. *Ascenseurs et monte-charge.* — Les Américains furent les premiers à construire des ascenseurs destinés au service des personnes. Ces appareils firent leur apparition en France à l'Exposition universelle de 1867 et y eurent un vif succès. Aussitôt après, les hôtels parisiens de premier ordre et les principaux magasins de nouveautés en installèrent pour leur clientèle. Les ascenseurs ne s'introduisirent que plus lentement dans les maisons particulières, où la manœuvre, abandonnée aux usagers eux-mêmes, devait offrir une exceptionnelle simplicité et ne laisser place à aucun danger, fût-ce entre des mains inexpérimentées et malhabiles; à cet égard, certains problèmes restaient à résoudre et leur solution pratique exigea d'assez longs délais; d'ailleurs, le temps seul pouvait apporter au public la confiance nécessaire.

Aujourd'hui, les appareils sont robustes et sûrs, présentent toutes les garanties désirables. Le voyageur est commodément installé et parfaitement protégé dans la cabine. Un système de serrures à boutons lui permet de déterminer, avant la mise en marche, l'étage auquel il s'arrêtera. Le départ se fait sans effort; l'arrêt a lieu automatiquement et en douceur au niveau voulu. Des enclenchements solides empêchent la cabine de se mouvoir aussi longtemps qu'une quelconque des portes palières n'est pas fermée et interdisent l'ouverture de ces portes tant que la cabine n'est pas arrêtée à leur hauteur. La cabine s'arrête d'elle-même à l'étage supérieur et au bas de la course, en l'absence de toute indication; jamais elle ne peut dépasser ces limites. En prévision de ruptures, des parachutes sont souvent adaptés aux ascenseurs; leur utilité a donné lieu à des controverses et dépend de la nature des appareils.

C'est l'eau sous pression qui fournit le plus généralement la force motrice. Elle se prête à l'emploi de mécanismes simples, assure la douceur et la précision des arrêts, constitue un modérateur de vitesse

d'une sécurité parfaite. Dans les cas ordinaires, on l'emprunte aux canalisations publiques. Rien ne s'oppose à l'utilisation d'autres agents moteurs, électricité, air comprimé, vapeur, etc.

Les ascenseurs hydrauliques comportent des dispositifs variés. Habituellement, la cabine, équilibrée par des contrepoids et dirigée par un guidage, reçoit le mouvement d'un piston de presse hydraulique, soit sans intermédiaire, soit par des câbles mouflés. Pour les ascenseurs à action directe, la cabine est reliée à la tête d'un piston plongeur, dont la longueur surpasse un peu la course totale et qui pénètre dans un cylindre en fonte placé au-dessous du sol : la machinerie, relativement coûteuse et difficile à surveiller en certaines de ses parties, offre un aspect très rassurant et s'équilibre aisément; les deux ascenseurs de 60 mètres établis dans les tours du Trocadéro, lors de l'Exposition de 1878, étaient de ce système. Le dispositif à câbles mouflés réduit beaucoup la course du piston, permet de mettre le cylindre moteur entièrement au-dessus du sol, simplifie par suite la construction et l'entretien, mais rend l'équilibre plus difficile à réaliser. Dans un cas comme dans l'autre, la distribution de l'eau en pression est commandée par un câble intérieur à la cabine ou par une tringle extérieure.

En 1889, deux ascenseurs hydrauliques fort intéressants avaient été installés contre la galerie des Machines. Leurs particularités spéciales étaient le remplacement des contrepoids par un compensateur hydraulique et, pour l'un d'eux, la substitution d'un piston creux et télescopique au piston ordinaire. En composant d'un nombre suffisant de tronçons les pistons de ce dernier genre, on réduit dans une large mesure ou on supprime même le puits des ascenseurs à plongeur usuel.

Les organisateurs de l'Exposition universelle de 1900 avaient mis à la disposition des visiteurs plusieurs ascenseurs électriques, hydrauliques, aéro-hydrauliques ou hydro-électriques. Dans les ascenseurs électriques, la cabine était uniformément suspendue à des câbles métalliques passant sur des poulies, au sommet du pylône de guidage, et s'enroulant, à la partie inférieure, autour du tambour d'un treuil qu'actionnait une dynamo; les seules variantes touchaient aux dispo-

sitifs de mise en marche ou d'arrêt à l'aide des contacts électriques établis sous la main du conducteur. Un ascenseur hydraulique à suspension funiculaire avait sa mise en marche assurée par un palan différentiel hydraulique, organe susceptible d'être construit à volonté pour une force unique ou pour deux puissances différentes; il était pourvu d'un régulateur de vitesse et d'un appareil de sûreté à griffes. Les ascenseurs aéro-hydrauliques, à piston plongeur ordinaire et à contrepoids, se trouvaient alimentés par des réservoirs d'eau et d'air comprimé à 5 atmosphères. Enfin, pour l'ascenseur hydro-électrique, l'eau sous pression venait d'un accumulateur contenant moitié d'eau et moitié d'air à 12 atmosphères; un interrupteur automatique mettait en mouvement et arrêta à l'instant voulu une dynamo, qui commandait des pompes reprenant l'eau dans la bache de retour pour la refouler vers l'accumulateur et pourvoyant aux déperditions d'air.

Des ascenseurs très puissants, établis en 1889 et modifiés en 1900, desservaient la Tour de 300 mètres. Ils sont décrits dans mes rapports sur les deux dernières Expositions universelles de Paris. Pendant l'année 1900, deux ascenseurs de Fives-Lille étaient affectés au service du premier et du deuxième étage; un ascenseur Otis, au service spécial du premier étage; un ascenseur Edoux, aux relations entre la deuxième et la troisième plate-forme. Les uns et les autres appartenaient au système hydraulique et dépendaient d'une usine centrale à vapeur. Munis de cabines à deux compartiments superposés, d'une capacité totale de 100 voyageurs, les ascenseurs Fives-Lille se rattachaient au type funiculaire; le mouvement leur était communiqué par des équipages mobiles ayant comme organe essentiel une presse hydraulique qui fonctionnait sous une pression de 54 kilogrammes; un accumulateur à plus faible pression récupérait partiellement le travail moteur; des freins à palettes et crémaillères, pouvant agir automatiquement ou être commandés à la main, garantissaient la sécurité. L'ascenseur Otis, également à suspension funiculaire, avait une cabine à deux compartiments, capable de recevoir 80 personnes et partiellement équilibrée par des contrepoids; le moteur était un palan à piston hydraulique; au besoin, le conducteur réglait la vitesse en agissant sur le distributeur par l'intermédiaire de câbles et d'un

servo-moteur; l'appareil de sûreté à déclenchement automatique se composait de ressorts et de coins. Quant à l'ascenseur Edoux, il comprenait en réalité deux appareils, un ascenseur à deux pistons plongeurs recevant l'eau du sommet de la tour et ne parcourant que la moitié supérieure de la distance, une cabine double faisant contrepoids à la cabine semblable du premier appareil et parcourant en sens inverse la seconde moitié de la distance; le second appareil était pourvu d'un frein hélicoïdal Backmann et d'un frein hydraulique donnant des garanties supplémentaires.

Les monte-charge, destinés à l'élévation des fardeaux de toute nature, fonctionnent aussi le plus fréquemment par l'eau comprimée. On a créé, dans ce système, des appareils d'une puissance énorme, capables de soulever un bateau chargé.

3. *Chemins élévateurs.* — Aux ascenseurs desservant le premier étage des palais de l'Exposition universelle de 1900, l'Administration avait ajouté 27 chemins élévateurs, non compris deux appareils de même nature établis pour le service du chemin de fer électrique et de la plate-forme mobile.

Les chemins élévateurs, connus aussi sous la dénomination de rampes mobiles ou de tapis roulants, ont été inaugurés en France dans les magasins du Louvre, après l'Exposition de 1889. Ils consistent essentiellement en un tablier sans fin, souple et résistant, à déroulement continu et uniforme, qui reçoit les passagers au bas de sa course et les dépose au sommet. Des mains courantes, animées de la même vitesse, fournissent un appui aux personnes qui désirent en user.

Pour les chemins élévateurs de l'Exposition, la largeur était fixée à 0 m. 60 au niveau des pieds et à 0 m. 90 au niveau des mains courantes, l'inclinaison à 0.33, la charge normale à un passager par mètre linéaire et la charge maximum au double, la vitesse minimum à 0 m. 50 et la vitesse maximum à 0 m. 60. Leur capacité de débit horaire dépassait 4,000 passagers. Tous recevaient le mouvement d'une dynamo.

Le tablier sans fin présentait des dispositions variées : courroie

formée par l'assemblage de lamelles en cuir, s'enroulant autour de deux tambours dont l'un moteur et soutenue par des tambours de renvoi ainsi que par des rouleaux; suite de planchettes transversales, avec chaîne de Galle médiane, galets latéraux et recouvrement de baguettes longitudinales caoutchoutées; traverses en bois sur fers plats, recouvertes d'un tapis et portées par des chaînes de Galle que supportaient des galets. Il n'y avait pas moins de diversité dans la structure des mains courantes, faites tantôt de toile caoutchoutée avec garniture de velours, tantôt de gutta-percha et de maillons métalliques, tantôt d'éléments articulés en bois sur une chaîne de Galle. L'allongement du tablier pouvait être, au besoin, compensé par des tendeurs. En cas d'accident, des comes ou des rochets arrêtaient immédiatement l'organe moteur.

Dans la section des États-Unis figurait un escalier transporteur électrique à marches articulées, qui répondait au même but que les chemins élévateurs. Par un jeu de rails et de guides convenablement disposés, cet appareil offrait toujours à sa base et à son sommet des paliers horizontaux facilitant l'accès et l'évacuation des voyageurs.

3. Machines hydrauliques élévatoires. — Le problème de l'élévation des eaux est de ceux qui ont le plus mis en éveil la sagacité des inventeurs. Il a reçu de nombreuses solutions. Abstraction faite des machines hydrauliques élévatoires consacrées exclusivement à des usages spéciaux, on peut citer les pompes à piston animé d'un mouvement alternatif, les pompes rotatives, les pompes à chapelet, les norias, les roues à godets, les roues à palettes, les tympans, les vis, les pompes centrifuges, les béliers hydrauliques, etc.

Malgré les perfectionnements apportés aux autres systèmes, celui des *pompes à piston animé d'un mouvement alternatif* prévaut encore dans l'immense majorité des cas. Ces pompes, qui paraissent avoir été inventées par les Grecs, se sont peu à peu améliorées dans la suite des temps. Le xix^e siècle leur a apporté, comme ses devanciers, un utile contingent de progrès.

Aujourd'hui, pour les grandes hauteurs de refoulement, on emploie presque uniquement le piston plongeur, imaginé dès 1674 par Morland.

Jadis, il paraissait indispensable de ne donner au piston des grandes machines élévatoires qu'une vitesse très modérée, de manière à éviter les chocs et les remous qui absorbent en pure perte beaucoup de travail et compromettent les organes. Maintenant, on ne craint plus de lui imprimer des vitesses comparables à celles des pistons à vapeur, ce qui a permis de réduire les dimensions des appareils et de simplifier les transmissions. Pour atteindre ce résultat, il a fallu modifier les formes du plongeur, l'effiler, lui attribuer un diamètre très inférieur à celui du cylindre; les passages d'eau et les soupapes ont reçu des proportions qui rendent les pertes de force vive aussi faibles que possible; ces fortes dimensions des clapets, comparées au diamètre relativement restreint du plongeur, rendent tout à fait caractéristique la physionomie des pompes modernes.

Les pompes ordinaires ont des soupapes en cuir ou en caoutchouc. Quand la pression à vaincre devient considérable, on a recours aux soupapes métalliques. Pour les pompes alimentaires, l'ancienne soupape à boulet est encore en usage, mais cède progressivement la place à la soupape conique. Les clapets à ressorts de D. Girard fournissent un excellent service dans les grands appareils élévatoires; ils ont souvent plusieurs sièges concentriques.

Des réservoirs d'air, ayant pour but de régulariser la vitesse ascensionnelle, sont ordinairement disposés au départ de la conduite de refoulement, et quelquefois aussi sur la conduite d'aspiration. Les constructeurs s'attachent, d'ailleurs, à rendre uniforme le mouvement de la colonne d'eau ascendante, indépendamment de l'action du réservoir d'air.

Par leur hauteur d'aspiration, surtout par leur hauteur de refoulement, par la longueur de leurs conduites ascensionnelles et par l'énormité de leur débit, les puissantes machines installées pour l'alimentation des villes ou des canaux résument la plupart des difficultés qui se présentent dans l'élévation des eaux. D'habiles hydrauliciens ont consacré leur talent à résoudre ces difficultés; au premier rang se place D. Girard.

Les *pompes rotatives* de quelque valeur pratique ne remontent guère au delà du *xvii^e* siècle. Elles peuvent être à un seul axe ou à deux

axes. Leur principe se prête aux combinaisons les plus variées et a engendré toute une série de types pendant le cours du XIX^e siècle. Généralement, elles donnent un assez bon débit; mais certains inconvénients dus à leur structure et à leur mode d'action sur l'eau en ont empêché le succès.

D'origine fort ancienne, les *chapelets*, *norias*, *roues à palettes*, *tym-pans*, *vis*, etc., sont encore employés pour le puisage de l'eau à de faibles profondeurs, dans les pays dont la situation exclut des appareils plus compliqués. Ils n'ont reçu, à l'époque contemporaine, que des modifications secondaires.

Malgré l'accélération récemment admise pour les pompes à piston, la vitesse de l'eau dans ces pompes, comme dans les autres machines élévatoires précédemment énumérées, ne dépasse pas des limites relativement étroites. Il en va autrement des *pompes centrifuges* : ici, c'est la vitesse imprimée à l'eau qui lui fait surmonter la pression de refoulement et qui détermine son mouvement ascensionnel.

Bien que la généalogie des pompes centrifuges remonte au XVIII^e siècle, les premiers appareils de ce genre ayant fonctionné industriellement furent ceux qu'Appold commença à construire en Angleterre vers 1848 et qui servirent d'abord aux dessèchements. Appold adopta au début des ailettes planes, mais ne tarda pas à les remplacer par des ailettes courbes. D'habiles constructeurs suivirent la voie qu'il avait ouverte; de nombreuses améliorations purent être réalisées et le rendement, jusqu'alors assez faible, devint comparable à celui des pompes à piston. Dès 1867, le succès des pompes centrifuges était assuré; depuis, leurs applications n'ont cessé de se multiplier et de croître en importance.

Parmi les avantages de ces pompes, le principal réside dans leur légèreté et leur petit volume, même pour des débits considérables. Elles se transportent et se montent facilement, ne comportent pas d'organes délicats ou capricieux, livrent sans inconvénient passage aux eaux chargées de sable et de gravier. Leur service économique dans les installations provisoires en a fait l'outil ordinaire d'épuisement sur les chantiers de travaux publics; elles ont également pris place dans beaucoup d'installations permanentes (irrigations, relèvement et épan-

dage des eaux d'égout, industrie minière, etc.). À l'Exposition universelle de 1900, on en voyait des modèles établis pour une hauteur de refoulement sans relais de 150 mètres ou pour un débit de 8,750 mètres cubes à l'heure.

Quelque multipliés qu'aient été les emplois des pompes centrifuges, leur théorie reste imparfaite.

Le *bélier hydraulique*, dont l'invention est due à J.-M. de Montgolfier (1797), réunit dans un même appareil le moteur et la machine élévatoire. Il utilise l'énergie de l'eau en mouvement pour l'élévation d'une partie du liquide et travaille par pulsations. De Caligny, Andral, Courbebaisse et surtout Ernest Bollée l'ont successivement perfectionné. M. Bollée fils présentait en 1900 des béliers remarquables par les dispositions prises afin d'amortir le choc des clapets, de les faire tourner systématiquement, d'en prévenir l'usure rapide ou irrégulière.

Un ingénieur américain, H. Hall, restaurant la vieille machine à vapeur de Savery et la rendant automatique, a créé le *pulsomètre*, qui figurait abondamment à l'Exposition de 1878. C'est une pompe ingénieuse et rustique, dans laquelle la pression de la vapeur agit directement sur la surface de l'eau à élever, sans l'intermédiaire de pistons ni de tiges; ses organes mobiles se réduisent à des clapets et à une petite soupape faisant l'office de distributeur; elle n'exige aucune fondation et fonctionne au besoin entièrement noyée. La vapeur peut être remplacée par l'air comprimé.

Vers la fin du siècle, plusieurs inventeurs ont construit des *élévateurs d'eau par l'air comprimé*. Ces appareils sont constitués le plus souvent par une cloche plongée dans l'eau et mise alternativement en communication avec l'air extérieur qui leur permet de se remplir, puis avec l'air comprimé qui assure le refoulement; des distributeurs automatiques, des jeux de clapets convenablement disposés effectuent les manœuvres nécessaires. Quelquefois, il n'y a ni clapet, ni piston : le liquide sort mélangé à l'air, et c'est la diminution de densité du mélange qui détermine la force ascensionnelle.

Les *pompes à incendie* méritent une mention spéciale. Dès 1830, Braithwaite et Ericsson, de Londres, construisirent une pompe à va-

peur, capable de fonctionner vingt minutes après l'allumage des feux. Puis vint, en 1841, la pompe, malheureusement trop lourde, de Hodge aux États-Unis. Vers 1860, MM. Latta, de Cincinnati, réussirent enfin à établir des machines légères et puissantes, qu'adopta le corps local des pompiers. Cet exemple fut progressivement suivi par les villes importantes de l'Ancien et du Nouveau Monde. Partout, les constructeurs surent réaliser des appareils très mobiles, doués d'une merveilleuse rapidité de vaporisation. Un progrès de la fin du siècle a été la création de pompes électriques automobiles, dont le moteur actionne à volonté le mécanisme de traction ou le mécanisme de projection.

Ces pompes complètent l'admirable matériel de sauvetage dont dispose le régiment d'élite des sapeurs-pompiers de Paris : bouches d'incendie espacées de 100 mètres, permettant l'utilisation directe de la haute pression des conduites municipales; échelles atteignant 20 mètres de hauteur; fourgons automobiles électriques; dévidoirs; ventilateurs; casques respiratoires et compresseurs d'air; lampes électriques; avertisseurs téléphoniques distants de 400 ou 500 mètres; réseau spécial de télégraphie et de téléphonie.

4. Machines soufflantes; ventilateurs. Machines aspirantes. —

Les appareils à injecter l'air sous pression reçoivent depuis longtemps d'importantes applications dans la métallurgie et dans la ventilation. D'une manière générale, les machines soufflantes, les ventilateurs ou les autres appareils du même genre se distinguent des machines à compression par le volume plus considérable de l'air mis en mouvement et par la pression plus faible à laquelle cet air est soumis.

Employées dès avant le xix^e siècle pour les souffleries de forges, les pompes à piston ont subi, depuis, de profondes transformations. Le cylindre à double effet s'est substitué au cylindre à simple effet; d'autre part, l'action directe du piston à vapeur sur le piston soufflant a remplacé celle du balancier. On place les cylindres horizontalement ou verticalement. Les vitesses de marche sont d'ailleurs très supérieures à celles des pompes hydrauliques.

Les pompes rotatives, que j'ai déjà mentionnées à propos de l'élé-

vation des eaux, remplissent aussi la fonction de machines soufflantes à faible pression.

En raison de leur simplicité, les ventilateurs à force centrifuge sont d'un usage courant. Ordinairement, leur organe essentiel est une roue à aubes courbes enfermée dans une caisse cylindrique et tournant à grande vitesse; cette roue reçoit l'air par le centre ou œillard et l'évacue par la circonférence. Le xix^e siècle a vu naître des types nombreux de ces appareils.

Pour les déplacements de très grands volumes d'air sans variation sensible de pression, on emploie souvent des ventilateurs qui agissent, non plus à la façon des pompes centrifuges, mais plutôt comme les hélices propulsives des navires; la roue mobile porte des palettes inclinées, et la masse d'air prend une vitesse parallèle à l'axe de rotation. Ces ventilateurs débitent par l'aire entière du cercle que décrivent les palettes; ils sont peu encombrants et faciles à installer.

On utilise aussi des appareils à entraînement, des machines à cloche, etc.

Un exemple remarquable de ventilation était celui de la salle des Fêtes, du palais de l'Agriculture et des Aliments, de la galerie des groupes électrogènes et de deux halls voisins de la salle des Glaces à l'Exposition de 1900. Les locaux mesuraient 1,478,000 mètres cubes. Ils étaient pourvus de 42 appareils (ventilateurs ou déplaceurs d'air), dont le débit individuel allait jusqu'à 65,000 mètres cubes par heure et qui avaient un débit horaire total de 1,066,000 mètres cubes. Certains de ces appareils comportaient des chambres réfrigérantes à atmosphère humide. Les résultats ont été excellents.

De très légères modifications suffisent à changer les machines soufflantes en machines aspirantes. Ces machines sont utilisées pour l'évacuation de l'air vicié, ainsi que pour des extractions de gaz ou de vapeurs dans diverses opérations industrielles.

5. Appareils de graissage. Joints. — Il est essentiel, pour le bon rendement mécanique et économique des machines, d'atténuer dans toute la mesure possible l'usure et les déperditions de travail par le frottement, ainsi que les fuites du fluide moteur au travers des joints.

Bien que déjà abordée à propos des machines à vapeur, cette question doit être reprise ici dans son ensemble.

Aujourd'hui, les frottements de quelque importance s'établissent entre matières d'une inégale dureté, de manière à reporter l'usure sur la pièce la moins coûteuse et la plus facile à remplacer. Le bronze phosphoreux et surtout le métal anti-friction, porté par un support en fonte, jouissent d'une grande faveur pour les coussinets, qui, parfois, sont aussi faits en bois dur.

Jadis, les huiles et les graisses végétales ou animales étaient seules employées au graissage : elles donnaient naissance à du cambouis, se décomposaient sous l'action des températures élevées et notamment au contact de la vapeur, dégageaient des acides corrodant les pièces métalliques. On les a généralement abandonnées, en particulier pour la lubrification des pièces recevant de la vapeur, et on les a remplacées par des huiles minérales lourdes, riches en carbone, provenant de la rectification des pétroles, du goudron de gaz, des huiles de schiste ou de boghead. Les huiles fluides conviennent aux mouvements rapides, les huiles visqueuses aux fortes charges.

Au fur et à mesure qu'augmentait la vitesse des machines, le graissage a pris une perfection plus grande. La tendance actuelle est de graisser ou d'huiler automatiquement les principaux organes, de fournir le lubrifiant en surabondance, de distribuer l'huile sous pression ou de la projeter par des pistons plongeurs, de rendre l'écoulement visible et bien réglable, de récupérer le liquide en excès, puis de le purifier et de l'utiliser à nouveau. On va jusqu'à plonger certains organes dans des bains d'huile, à envelopper les têtes de bielle d'un carter rempli de lubrifiant. Un procédé qui a réussi pour les pistons de machines à vapeur consiste à graisser la vapeur elle-même, en faisant arriver sur son passage un filet d'huile, dont la pulvérisation s'opère immédiatement.

Les joints de surfaces fixes sont ordinairement établis par interposition et serrage d'une matière plastique, mastic de minium, plomb, cuivre, cuir, caoutchouc, gutta-percha, amiante, etc., suivant les cas. Pour les joints entre surfaces glissant l'une sur l'autre, le problème est plus difficile : l'étaupe, les segments métalliques et surtout le cuir

embouti tiennent bien la pression de l'eau; presque toutes les garnitures de pistons à vapeur se font en métal; dans leurs presse-étoupes, les garnitures en tresse de chanvre ou de coton sont souvent remplacées par des matières métalliques ayant une certaine malléabilité ou par des substances réfractaires à base d'amiante et parfois même supprimées; l'air exige des précautions exceptionnelles et appelle l'emploi de joints liquides, de garnitures métalliques, de pistons en caoutchouc.

6. Mesure de la force et du travail. — Parmi les instruments qui servent à la mesure des forces, la catégorie la plus nombreuse est celle des appareils de pesage, habituellement fondés sur le principe du levier. La simplicité, la facilité de manœuvre, la commodité de lecture des résultats sont, avec l'exactitude, les principales qualités requises des balances à l'usage du commerce. Au cours du siècle, des progrès considérables ont été réalisés dans la construction de ces appareils: entre autres inventions, il convient de signaler celle de la bascule portative par Quintenz (1821); depuis sa création, la bascule a reçu beaucoup de perfectionnements, revêtu des formes diverses, atteint une grande puissance. D'utiles innovations, comme celle de l'indication et même de l'impression automatiques du poids, méritent aussi d'être mentionnées. Quelquefois, dans un but d'économie, les opérations de pesée et de levage sont combinées et s'effectuent simultanément.

La pesanteur a été pendant longtemps la seule force qu'on se préoccupât de mesurer scientifiquement. Plus tard, le progrès industriel est venu introduire la précision dans la mesure des autres forces, pour lesquelles tout se bornait auparavant à des approximations souvent grossières.

A l'état statique, les forces se mesurent au moyen de *dynamomètres*, dont la plupart ont pour organe essentiel un ressort taré. Si élémentaire que soit le problème, il soulève néanmoins de sérieuses difficultés quand l'effort devient considérable, comme dans les essais mécaniques de métaux. Or un des traits caractéristiques de la métallurgie moderne est la rigueur avec laquelle elle doue ses produits des propriétés requises pour leur destination; il lui faut, à cet effet, des instruments de

contrôle d'une haute puissance, ne le cédant presque pas aux appareils de laboratoire les plus parfaits. L'usage de ces instruments s'est, d'ailleurs, étendu aux grands consommateurs de métaux; des laboratoires publics d'essais ont même été institués dans divers pays et possèdent des machines capables de fournir un effort allant à 500 tonnes. On éprouve les métaux à la traction, à la compression, à la flexion, à la torsion, au choc; dans les essais à la traction, qui sont les plus usuels, il s'agit de déterminer les allongements sous diverses charges, de fixer notamment la charge maximum que peut supporter le métal et l'allongement lors de la rupture. Habituellement, l'effort est produit par un piston hydraulique ou par une vis et mesuré au moyen d'une romaine, d'un manomètre à air libre par l'intermédiaire d'un liquide, etc. À côté des machines destinées aux essais de métaux s'en placent d'autres pour les diverses matières employées dans les constructions ou dans l'industrie : pierres, ciments, mortiers, fils, tissus, papier, etc. L'œuvre accomplie vers la fin du siècle au point de vue des essais de matériaux a été immense : une large part en revient à la Commission « des méthodes d'essais » qu'avait instituée le Ministre des travaux publics de France et d'où sont sortis de mémorables travaux, à l'Exposition universelle de 1900 et à ses Congrès internationaux; peu après l'Exposition, les pouvoirs publics ont fondé au Conservatoire des arts et métiers un laboratoire remarquablement outillé.

Les manomètres, précédemment mentionnés, ne sont que des dynamomètres d'une nature spéciale, propres à mesurer la pression des fluides, en particulier de la vapeur. Certains manomètres à tubes vont à 1,500 atmosphères.

Souvent, on a besoin de connaître la série des valeurs par lesquelles passe un effort variable : la question se pose chaque jour pour l'étude expérimentale des machines en mouvement. Les constatations se traduisent matériellement par un diagramme, ayant comme ordonnées les valeurs de la force et comme abscisses le temps, le déplacement d'un des points du système, la vitesse de ce point ou une fonction plus ou moins immédiate de l'une de ces variables. Quand les coordonnées sont la force et le déplacement du point d'application suivant la direction de cette force, la quadrature du diagramme donne le *travail* dé-

veloppé. James Watt a, le premier, mesuré de cette manière le travail de ses machines à vapeur. Repris et étendu par Morin, le procédé d'enregistrement automatique dont l'indicateur de Watt avait marqué l'origine a pris de nos jours une importance capitale dans toutes les sciences d'observation; il permet de scruter les moindres détails des phénomènes les plus complexes.

L'indicateur de Watt, perfectionné par Field, Mac-Naught, Combes, Morin, Clair, Richards, M. Marcel Deprez, etc., n'est applicable qu'aux moteurs actionnés par un fluide pressant sur un piston et ne fournit d'ailleurs que le travail sur ce piston. Pour la mesure du travail disponible sur un arbre, on a les *dynamomètres de rotation*, qui se distinguent en *dynamomètres d'absorption* et *dynamomètres de transmission*. Le principe des dynamomètres d'absorption réside dans l'opposition à la force motrice d'une résistance qui l'équilibre et dont la mesure soit facile; ces appareils ont pour prototype le frein de Prony (1821), que plusieurs ingénieurs se sont efforcés d'améliorer en assurant son réglage automatique et le refroidissement de sa poulie. Quant aux dynamomètres de transmission, ils interposent entre le moteur et le récepteur une transmission temporaire composée d'organes tels, que leurs tensions ou leurs déformations puissent s'observer aisément ou s'enregistrer automatiquement : White en a été un des initiateurs (1801).

Un genre particulier de travail, qui a fait l'objet de nombreuses recherches, est celui des moteurs de véhicules. Les appareils employés à ces recherches sont des dynamomètres de traction à ressort ou des dynamomètres d'inertie à pendule.

Il m'est impossible de passer en revue les multiples dispositions des instruments dynamométriques, les combinaisons ingénieuses et diverses adoptées pour les rendre enregistreurs. Les problèmes relatifs à la mesure du travail laissent encore ouvert un vaste champ d'études et de découvertes.

7. Indicateurs, compteurs, etc. — Parmi les différentes catégories d'indicateurs, l'une des plus intéressantes est celle des indicateurs de vitesse : compteurs des oscillations d'un balancier ou d'un piston

ou des tours d'un arbre, associés ou non à un compteur chronométrique; tachymètres en relation avec un arbre et donnant la vitesse par l'action de la force centrifuge sur des masses mobiles; etc. Ces appareils peuvent être enregistreurs.

Les compteurs à eau sous pression se rattachent à deux types principaux, les turbines et les machines à colonne d'eau. Pour les eaux sous pression, on emploie des roues à tympan, à augets ou à palettes, des flotteurs à mouvement alternatif, des balances, etc.

Après avoir essayé en 1815 un compteur à gaz fait de deux cloches qui s'élevaient et s'abaissaient alternativement, Samuel Clegg créa un appareil rotatif, d'où sont dérivés les compteurs actuels. Ces compteurs affectent la forme d'un tambour à compartiments, mobile autour d'un axe horizontal dans une enveloppe concentrique qui contient de l'eau jusqu'à un niveau réglé d'avance; le débit est donné par le nombre de tours, qu'enregistre un mécanisme compteur.

Il existe aussi des compteurs de vapeur, fondés sur un principe analogue.

8. Prévention des accidents de machines. — L'humanité, l'intérêt et la législation commandent aux industriels de ne rien négliger pour la protection de leur personnel contre les accidents de machines. De grandes associations d'initiative privée, dont la première fut constituée en 1867 à Mulhouse, par Engel Dollfus, se sont donné pour mission, en France et à l'étranger, d'étudier et d'indiquer à leurs membres les moyens les plus efficaces de préservation.

On voyait, en 1900, exposés par la grande Association des industriels de France contre les accidents du travail, de nombreux appareils protecteurs.

Il y a là une œuvre qui ne saurait être trop hautement encouragée et qui devra se poursuivre avec une inlassable persévérance.

§ 7. MACHINES-OUTILS D'UN USAGE GÉNÉRAL.

1. **Machines-outils pour le travail des métaux.** — Celui qui, de nos jours, visite un atelier de construction mécanique et y voit les engins dont est doté cet atelier, a peine à concevoir l'époque, cependant peu reculée, où l'homme ne disposait que de ses bras et d'outils plus ou moins imparfaits. L'ouvrier finissait par arriver à son but, comme le plus mince filet d'eau arrive à creuser son sillon dans la pierre. Mais que de force, d'adresse, de patience et de temps il lui fallait dépenser!

D'une manière générale, l'introduction des machines-outils a été une véritable révolution matérielle et sociale, l'une des plus belles conquêtes de l'industrie moderne. Elle a permis de fabriquer des pièces de dimensions jadis inabordables, d'apporter au travail de ces pièces une précision pour ainsi dire mathématique, de le rendre beaucoup plus rapide et infiniment plus économique. Elle a relevé la condition de l'ouvrier en le dégageant d'un labeur ingrat et en lui laissant néanmoins la partie de sa tâche qui exige de l'intelligence, de la volonté et du goût.

Au début, des esprits timorés redoutaient que les machines-outils n'enlevassent à la population ouvrière ses moyens d'existence : sans doute, leur apparition a pu causer des crises temporaires et locales; mais, en définitive, elles ont accru la production dans une mesure inouïe et rendu avec usure ce qu'elles prenaient sous une autre forme. S'il fut un temps où des ouvriers mal éclairés s'insurgeaient à l'approche de ces engins diaboliques qui devaient les dépouiller de leur gagne-pain, actuellement la seule idée d'un retour en arrière susciterait de bien plus violentes révoltes.

D'ailleurs, on peut dire que les machines-outils n'ont pas remplacé le travail manuel, mais créé un mode de travail nouveau, donné à l'homme une puissance nouvelle sur la matière. Sans elles, des ouvriers si vigoureux, si habiles et si nombreux qu'on les suppose, ne pourraient parvenir à fabriquer les pièces énormes qui entrent aujourd'hui dans la construction des machines, ni surtout à leur impri-

mer le degré de précision indispensable. Nous n'aurions ni nos puissantes locomotives, ni nos belles machines de navigation à vapeur.

La vapeur a créé les machines-outils; en échange, les machines-outils ont procuré à la vapeur des moyens d'action dont elle n'eût jamais disposé. C'est ainsi que tout se lie et s'enchaîne en ce monde, et que, même dans le domaine de la matière, les bienfaits ne sont pas perdus.

Nées vers 1750, les machines-outils à travailler les métaux se développèrent d'abord en Angleterre, grâce à Bentham, Bramah, Maudslay, etc. La France, rendue à la paix après 1815, suivit l'impulsion de la Grande-Bretagne. Vers 1825, nos ateliers commencèrent à se peupler de machines anglaises : tours parallèles avec support d'outil ou équipage à chariot; tours parallèles à bancs, jumelles et poupées fixes ou mobiles; tours à fileter les pas de vis; grands alésoirs horizontaux à tourner et polir intérieurement les cylindres en fonte; machines verticales à forer; machines à mortaiser, fendre ou tailler; etc.

Toutefois l'outillage mécanique ne prit vraiment son essor qu'avec les chemins de fer, les navires à vapeur et les ponts métalliques. On vit successivement apparaître les machines radiales à forer verticalement de Benjamin Hick, de nouvelles machines verticales à aléser les grands cylindres en fonte, les machines à planer de Fox, de Clément, de Nasmith et Gaskell, de Collier, de Lewis, de Hetherington, la machine à river de Fairbairn.

Jusqu'ici, je n'ai cité que des Anglais. Cependant nos ingénieurs ne restaient pas inactifs. Dufrénoy, Élie de Beaumont, Coste et Perdonnet avaient consacré leur talent et leur science à d'importantes publications sur l'outillage britannique. Un concours ouvert en 1839 par la Société d'encouragement de Paris fit connaître nombre de belles machines déjà employées dans les établissements de Pihet, Cavé, Laborde, Saulnier, Hallette, etc., et se distinguant de leurs similaires anglaises par des simplifications, par des combinaisons d'ensemble ou de détail souvent heureuses. L'Exposition de 1844 mit en lumière les mérites de plusieurs constructeurs français, Saulnier, Pihet, Calla,

Decoster. Vers 1850, ces constructeurs, auxquels il faut joindre Mesmer, Stehelin, Huguenin et Ducommun, soutenaient dignement le renom de la France, en face des industriels anglais précédemment cités, de Sharp, de Shanks, de Withworth, célèbre pour ses tours et ses planeuses.

À Londres, en 1851, nous eûmes le très grave tort de nous abstenir; il en fut de même des Allemands et des Américains. La Grande-Bretagne, au contraire, exposait avec une étonnante profusion ses machines à tourner, fileter, fendre et diviser, aléser, mortaiser, buriner, limer et dresser les métaux. Le succès fut pour Withworth, dont les machines-outils se recommandaient par la pureté des formes, la bonne répartition de la matière, la stabilité, l'agencement rationnel et la précision de l'ajustement; on remarqua surtout les outils glissants, qui envahissaient les ateliers de petite fabrication. Peu après, le général Poncelet écrivait son admirable rapport sur les *Machines et outils*.

Withworth se maintint au premier rang lors des Expositions universelles de 1855 et de 1867. À cette dernière date, la fraise, un instant déchuë, reprenait une extrême faveur et entraînait dans la composition de nombreuses machines, portant le nom générique de machines à fraiser; la scie à lame sans fin, si précieuse pour le découpage du bois, devenait aussi l'outil le mieux approprié pour le découpage du fer et débitait des plaques de 0 m. 025 d'épaisseur, à raison de 0 m. 04 par minute; les bâtis en fonte d'une seule pièce, qu'avait inaugurés Withworth, se répandaient de plus en plus, au grand profit de la stabilité; les constructeurs cherchaient à accroître l'automatisme des machines, notamment de celles qui étaient destinées à une fabrication spéciale; les Américains du Nord imaginaient des dispositions originales, différentes de celles des Européens.

Sauf le dispositif adopté par Tweddell pour river au moyen de l'air comprimé, l'Exposition de 1878 ne révéla pas d'innovation considérable. Mais elle témoignait d'efforts continus en vue de réduire les frais de transformation des pièces d'œuvre, soit par l'augmentation de la puissance des machines, soit par leur automaticité plus complète, soit par des combinaisons permettant le façonnage dans le plus

grand nombre de directions possible, sans déplacement de la pièce sur son support, sans changement de montage, cette opération étant toujours difficile, souvent longue et délicate. Chaque jour, la fraise entraînait davantage dans la pratique; on était parvenu à vaincre les difficultés que la fabrication de cet outil présentait au point de vue de la trempe, dès qu'il sortait des formes ordinaires ou des échantillons courants. Aux bâtis à nervures extérieures se substituaient les bâtis pleins à noyau, favorables pour la bonne répartition du métal, la tenue des douilles et l'entretien. L'acier doux remplaçait le fer dans la confection des organes.

Les vingt dernières années du siècle ont consolidé les progrès antérieurs et amené quelques progrès supplémentaires, dont les savants rapporteurs des Expositions de 1889 et de 1900 se sont attachés à fournir une nomenclature minutieuse.

Donnant libre carrière à leur imagination et à leur esprit inventif, les constructeurs ont suivi pas à pas les besoins de l'industrie, devancé même ces besoins, établi des engins aux dimensions colossales capables d'usiner les plus fortes pièces que puisse fournir la métallurgie.

Tandis que certaines machines prenaient un caractère très général et donnaient la facilité d'exécuter sur leur table des opérations variées, d'autres tendaient inversement à se spécialiser, à se cantonner dans des opérations de nature limitée. L'automatisme s'accroissait d'ailleurs pour les machines spéciales, diminuant le personnel préposé à leur conduite, permettant d'y occuper des ouvriers moins habiles, procurant des garanties exceptionnelles de précision, favorisant l'interchangeabilité, mais exigeant en revanche que le montage et le réglage fussent exclusivement confiés à des praticiens émérites.

Rien n'a été négligé afin d'accroître la stabilité des machines et leur résistance aux efforts de flexion ou de torsion, d'en améliorer le réglage et la lubrification, d'en mieux assurer la conservation et le parfait entretien.

Les machines à mouvement alternatif, comportant un retour à vide, ont reçu des perfectionnements qui accélèrent ce retour et qui, en outre, uniformisent la vitesse de travail.

Des formes plus correctes sont attribuées aux outils. On emploie à leur confection des métaux plus durs, des aciers au nickel, au manganèse, au tungstène, ce qui permet d'en accélérer la marche et d'en élever le rendement dans une large proportion. Leur mise en place et leur remplacement offrent moins de difficultés.

La simplicité de conduite, la commodité de surveillance, la sécurité des ouvriers constituent des préoccupations dominantes pour les constructeurs.

D'excellentes séries d'instruments de traçage, de mesure et de vérification sont mises à la disposition des ateliers. On recourt aux appareils optiques pour constater et corriger au besoin les défauts de rectitude des lignes et des surfaces.

Le souci de l'interchangeabilité devait pousser à des mesures d'uniformisation. Sur l'initiative de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, un système international de mesures métriques a été récemment introduit dans la construction des vis. Il est à souhaiter que l'unification s'étende aux engrenages et à d'autres organes.

Tous ces progrès ont apporté avec eux l'économie, la précision dans les procédés de travail, la perfection dans les objets fabriqués, c'est-à-dire d'incalculables avantages. Aussi ne saurait-on trop insister sur l'intérêt qu'ont les chefs d'usines à acheter exclusivement un outillage très soigné et à ne point reculer, dans ce but, devant un surcroît de dépenses d'acquisition, dont ils sont promptement rémunérés.

Parmi les machines-outils auxquelles l'époque contemporaine a donné une expansion remarquable, la première place appartient aux machines à fraiser et aux machines à meuler. Par leurs dispositions et par la forme de leurs outils, les machines à fraiser se prêtent aux opérations les plus diverses, au travail des pièces les plus volumineuses et les plus compliquées. Les meules d'émeri, sans lesquelles les machines à fraiser n'auraient pu bénéficier d'un tel développement, s'adaptent à l'affûtage de tous les outils, sont l'auxiliaire le plus puissant des ateliers d'outillage, étendent même leur action dans ces ateliers en suppléant à l'insuffisance de précision des outils coupants pour la confection des pièces trempées.

Une nouveauté intéressante est la commande individuelle des machines-outils par une ou plusieurs dynamos.

Sous le bénéfice de ces considérations générales, voici les catégories entre lesquelles se répartissent les machines-outils et les observations particulières qu'appelle leur situation actuelle.

1. *Tours.* (Tours horizontaux ; tours verticaux ; tours horizontaux à outils multiples ; tours horizontaux automatiques à outils multiples.) — Le tour, considéré pendant longtemps comme l'outil universel par excellence, tend à se spécialiser en vue des seuls travaux de tournage et à se dégager des fonctions multiples qui exigeaient la présence d'un ouvrier d'habileté spéciale. Par l'adjonction d'un harnais de maniement simple et facile, on évite au conducteur le calcul et la recherche des combinaisons de vitesse entre l'avance du chariot et la rotation de la poupée. Dans le travail des pièces de grand diamètre, le tour à axe vertical prend la place du tour à axe horizontal, parce qu'il facilite le montage, en diminue le danger et assure mieux la stabilité. On voit aussi se répandre les tours à plusieurs outils, semi-automatiques ou complètement automatiques, pour le travail en série de pièces à décolleter dans la barre ou le façonnage de pièces forgées.

2. *Machines à percer.* (Machines verticales avec avance à la main ; machines verticales avec avance automatique ; machines à broches multiples ; machines radiales ; machines spéciales à percer les trous polygonaux, à percer automatiquement les canons de fusil, etc.) — Dans les machines d'usage général, l'outil tourne et la pièce reste fixe ; il en est autrement pour les perçages de grande longueur. Les nécessités de l'industrie moderne ont déterminé la naissance de machines pouvant percer simultanément un nombre considérable de trous. Des différents outils, le plus usuel est maintenant le foret américain.

3. *Machines à aléser.* — La disposition verticale ou la disposition horizontale prévalent suivant les proportions des pièces. Des machines spéciales ont été établies pour les trous multiples, parallèles, perpendiculaires ou obliques les uns par rapport aux autres ; elles sont en général aptes non seulement à l'alésage, mais au perçage et souvent au fraisage.

4. *Machines à tarauder.* — La seule indication essentielle est celle qui a été donnée au sujet de l'uniformisation des mesures dans la construction des vis.

5. *Machines à raboter.* (Machines à raboter proprement dites; machines à raboter latérales; étaux limeurs; machines spéciales à rayer automatiquement les canons de fusil.) — On accélère le retour à vide et on uniformise la vitesse du travail. L'encombrement est réduit. Dans les machines à raboter proprement dites, la table se meut tandis que l'outil demeure fixe; l'inverse a lieu dans les machines à raboter latérales, qui conviennent aux pièces de fortes dimensions et de formes compliquées.

6. *Machines à mortaiser.* — Ces machines ne sont que des étaux limeurs, dans lesquels le mouvement du coulisseau porte-outil est vertical, au lieu d'être horizontal.

7. *Machines à fraiser.* (Machines horizontales; machines verticales; machines horizontales et verticales, à orientation variable de l'arbre de la fraise; machines à reproduire; machines spéciales.) — Elles peuvent avoir l'axe de la fraise horizontal, vertical ou inclinable à volonté. Le mouvement de montée et de baisse y est imprimé, tantôt à l'arbre porte-fraise, tantôt à la table. Presque toutes disposent de mouvements automatiques, rectilignes et horizontaux; quelques-unes possèdent en outre un mouvement de façonnage pour les surfaces à génératrice courbe de profil constant et à directrice irrégulière, ouverte ou fermée. Aujourd'hui, les machines à fraiser empiètent sur le domaine jadis réservé aux raboteuses.

8. *Machines à scier les métaux.* — Comme par le passé, l'outil de ces machines est, soit une scie circulaire, soit une scie à ruban sans fin, soit une scie alternative.

9. *Machines à tailler les engrenages.* — Il existe différentes espèces de machines pour la taille des engrenages cylindriques, des engrenages coniques, des roues à vis sans fin et des vis sans fin elles-mêmes. Une nouveauté de haut intérêt consiste à tailler les roues par l'engrènement de celles avec lesquelles elles doivent marcher.

10. *Machines à meuler.* — L'emploi des émeris artificiels et du carborundum, obtenus aux fours électriques, a vulgarisé la matière première de ces machines, dont j'ai rappelé les merveilleux progrès.

11. *Marteaux-pilons.* (Marteaux-pilons à main, à courroie de friction, à tige de friction, à excentrique et à ressort, atmosphériques, à vapeur.) — La masse frappante des marteaux-pilons d'atelier dépasse rarement 1,000 kilogrammes pour les engins à vapeur et 500 kilogrammes pour les autres.

12. *Presses.* — Sous cette rubrique se rangent des machines à découper, à poinçonner, à cisailer, à emboutir, à river, à faire par compression les boulons, les écrous et les vis. Les machines à river se classent en riveuses par percussion et riveuses par pression continue; ces dernières sont généralement préférées.

13. *Machines diverses à travailler les tôles, les fers en bandes et les fils métalliques; matériel de forge.* — Il y a là tout un ensemble de machines fort ingénieuses, utilisées dans la chaudronnerie, la ferblanterie, la quincaillerie, etc., pour cisailer, plier, border, moulurer, agraffer, sertir, rouler, cintrer, couder, refouler, laminier, dresser, etc.

14. *Machines-outils portatives.* — La transmission de la force motrice à ces machines se fait par l'intermédiaire de flexibles, par l'électricité, par la vapeur, par l'air comprimé, par l'eau sous pression.

2. *Machines-outils pour le travail du bois.* — Les machines-outils pour le travail du bois se divisent en deux catégories : machines à débiter le bois (scieries à mouvement rectiligne alternatif; scieries circulaires; scieries à lame sans fin); machines à façonner les bois débités (machines à raboter; toupies; tenonneuses; machines à raboter et à moulurer sur quatre faces; machines à percer et à mortaiser; tours; machines destinées à la fabrication des caisses; machines diverses).

Il faudrait remonter à une haute antiquité pour trouver l'origine des scieries hydrauliques à mouvement alternatif. Les scieries de ce genre ont été perfectionnées, au commencement du XIX^e siècle, par Navier, Bentham, Brunel, etc. D'autres améliorations furent réalisées, soit à l'occasion d'un concours ouvert en 1826 par la Société d'encouragement, soit après ce concours : on peut citer la réduction de l'épaisseur des lames, la diminution corrélatrice de la résistance et du déchet, l'accroissement notable de la vitesse, la pratique consistant à courber les extrémités des dents afin de les rendre parallèles à la lame,

l'affûtage à la meule d'émeri. Un des avantages de la scie à mouvement rectiligne alternatif est la facilité de son entretien; en revanche, elle a le défaut de ne travailler généralement que pendant la moitié de sa course. On s'en sert non seulement pour débiter les bois, mais pour abattre les arbres sur pied et les tronçonner : dès 1820, Hacks livrait, dans ce but, des machines à manège ; aujourd'hui, la force motrice est demandée à la vapeur ou à l'électricité, et les États-Unis, notamment, produisent de puissantes machines à grande vitesse permettant l'exploitation rapide et économique des vastes forêts.

Les scieries à mouvement rectiligne alternatif peuvent avoir, au lieu d'une lame unique, des lames juxtaposées.

Jusqu'en 1814, le débit des feuilles de placage s'opérait à bras, du moins en France. Vers cette époque, Cochot propagea son ingénieux système de scieries à mouvement alternatif horizontal avec chariot vertical porte-pièce, animé d'un mouvement ascensionnel discontinu et d'un déplacement parallèle vers la scie. Divers perfectionnements furent plus tard apportés à cet instrument. Un autre procédé de débitage en lames minces consiste dans le tranchage au couteau suivant un plan ou circulairement, de manière à dérouler la pièce de la circonférence au centre comme une spirale (Picot, Pape, Faveryer, etc.) : il fournit des feuilles dont l'épaisseur descend à un quart ou un cinquième de millimètre ; mais l'étuvage indispensable, joint à l'effort du couteau, fatigue les fibres de certaines essences.

Quelques auteurs ont attribué au célèbre Hook, contemporain de Newton, l'invention de la scie circulaire. Son apparition est, en tout cas, certaine vers la fin du XVIII^e siècle avec Bentham, Albert et Brunel. Elle a fait des progrès successifs au point de vue de la légèreté, de la vitesse, de la minceur, du dressage, du guidage et de la précision dans le montage. Divers appareils protecteurs ont été imaginés pour prévenir les accidents auxquels elle expose les ouvriers.

Imaginée en 1811 par Touroude, la scie à lame sans fin entra vers 1848 dans le domaine de la pratique, grâce à Périn. Elle a peu à peu éliminé, pour différents usages, la scie circulaire et rend d'immenses services dans les ateliers débitant des bois de formes variées. Sa vitesse

et son avance dépendent de la nature du travail; on a vu, en 1900, des machines pour grumes marcher à 2,400 mètres par minute, avec une avance de 10 millimètres.

Créées à la fin du XVIII^e siècle et au commencement du XIX^e (Bentham, Bramah, Roguin, Sautreuil), les machines à raboter présentent un tambour à couteaux tournant autour d'un axe fixe et un dispositif de cylindres presseurs amenant les planches sous les couteaux. Elles blanchissent une ou deux faces.

Le XIX^e siècle a engendré les toupies, véritables machines à fraiser qui exécutent les moulures sur champ. Ces machines sont ordinairement constituées par une table horizontale pour recevoir l'ouvrage et par un arbre vertical, à la partie supérieure duquel sont des couteaux ayant le profil voulu. Les outils rotatifs employés sur les toupies conviennent à la confection des tenons et des enfourchements. Par la combinaison des machines à raboter et des toupies, on arrive aux machines à raboter, bouveter, moulurer sur quatre faces, et spécialement aux machines à faire le parquet.

D'après le général Poncelet, Hubert aurait, vers 1814, établi à l'arsenal de Rochefort des machines à forer et à mortaiser. Les machines d'usage courant qui actionnent les outils, mèches et bédanes, ont beaucoup d'analogie avec les machines verticales pour le perçage des métaux à la main.

Malgré la similitude entre les tours à métal et les tours à bois, ceux-ci sont ordinairement plus simples. Les tours ordinaires ne peuvent façonner que des pièces à section circulaire. Quand la section affecte des formes quelconques et variables, on recourt aux tours à copier, qui auraient été inventés par de Barros, ingénieur portugais, puis construits en France par Decoster et perfectionnés aux États-Unis: le principe consiste à guider l'outil par un modèle placé sur un axe parallèle à celui de la pièce et animé d'un mouvement identique de rotation.

Parmi les machines diverses, il y a lieu de mentionner particulièrement celles qui servent à fabriquer la laine de bois. Elles ont fait leur apparition en 1889. Leurs outils sont des couteaux sur lesquels le bois avance automatiquement.

CHAPITRE VII.

ÉLECTRICITÉ.

§ 1. PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ.

1. **Générateurs mécaniques d'énergie électrique.** — Les générateurs mécaniques d'électricité sont fondés sur le développement de courants d'induction dans un induit tournant à travers un champ inducteur. Il me faut reprendre ici, avec un peu plus de détails, les indications déjà données relativement aux origines et aux progrès de ces générateurs.

En 1832, au lendemain de la découverte par Faraday des phénomènes d'induction, Pixii établit, d'après les conseils d'Ampère, une petite machine fournissant soit du courant alternatif, soit des courants ramenés à la même direction par un commutateur, machine que perfectionnèrent bientôt Saxton et Clarke (1833-1834). Les effets relativement considérables des nouveaux appareils suggérèrent l'idée de leur utilisation industrielle, en remplacement des piles auxquelles on substituerait des machines à courants, de grandes dimensions, actionnées par un moteur à vapeur. Ce fut l'éclairage électrique qui ouvrit la voie : la machine magnéto-électrique de Nollet, dite de l'*Alliance*, créée en 1850 et basée sur les mêmes principes que ses devancières, put, malgré son poids et son prix élevés, rendre plus tard d'utiles services à l'Administration des phares. L'électro-chimie suivit l'éclairage avec moins de succès, à cause des défauts de la commutation ; dans la machine Wilde employée à la galvanoplastie (1866), les électro-aimants prirent pour la première fois la place des aimants permanents ; les inducteurs étaient excités au moyen du courant d'une machine plus petite. Immédiatement après, vint la pensée d'utiliser pour l'excitation le courant même de la machine ou une fraction de ce courant ; elle trouva son application dans les machines dynamo-

électriques manœuvrées à bras par quarante hommes et capables de produire un arc puissant, que la maison Siemens construisit en vue d'usages militaires (1867).

Jusqu'alors, en dépit d'une tentative de Werner Siemens pour mettre à la disposition de la télégraphie un générateur de courant continu (1853), il n'existait que des machines à courants alternatifs. Cependant les moyens de produire mécaniquement du courant continu se trouvaient en germe dans une invention de Pacinotti, qui se place vers 1864. Pacinotti était l'auteur d'un petit moteur électrique où l'organe mobile se composait d'un certain nombre de bobines enroulées autour d'un anneau denté en fer doux et recevant par un commutateur à touches et galets le courant d'une pile électrique; au lieu d'être renversé simultanément dans tout l'anneau, le courant gardait constamment dans chaque moitié des directions de sens contraires, étant seulement renversé dans chaque bobine au moment d'un changement de touche. Une expérience des plus intéressantes avait permis à Pacinotti d'établir que, si on plaçait sa machine entre les pôles d'aimants permanents et si on lui imprimait un mouvement de rotation, elle devenait une génératrice de courant continu et fonctionnait comme une véritable pile. Cette expérience démontrait bien nettement la réversibilité des appareils de l'espèce, la possibilité de produire un courant par une dépense de travail dans toute machine propre à se mouvoir sous l'action d'un courant : déjà posé par Lenz et accepté par tous les savants, le principe de la réversibilité ne s'était pas répandu hors des laboratoires.

Gramme réinventa, en 1869, la machine de Pacinotti, mais avec des modifications très importantes au point de vue pratique : substitution d'un anneau lisse en fils de fer à l'anneau denté massif⁽¹⁾; remplacement des galets par des balais; construction du collecteur tel qu'on le comprend aujourd'hui; etc. Ainsi fut créée la dynamo industrielle, pouvant alimenter un ou plusieurs arcs voltaïques et particulièrement propre à la galvanoplastie. Les machines dynamo-électriques commencèrent aussitôt à se propager.

⁽¹⁾ Depuis, on est revenu à l'induit denté.

Peu de temps après, mariant les éléments essentiels de la machine Gramme à d'autres éléments empruntés aux machines antérieures, la maison Siemens et Halske construisait un type de machines à courant continu différant du type Gramme par le mode d'enroulement de l'induit, enroulement dit *en tambour*, presque toujours employé aujourd'hui (1873).

À partir de cette époque, les modèles de machines à courant continu se multiplièrent. Leur diversité s'affirma surtout dans les inducteurs; car les induits continuaient à se rattacher aux systèmes Pacinotti, Gramme ou Siemens.

Un nouveau progrès fut réalisé en 1882. Auparavant, on appliquait trois procédés d'excitation : l'excitation indépendante, l'excitation en série (passage dans l'inducteur de la totalité du courant produit par la machine), l'excitation en dérivation (passage d'une dérivation de ce courant). Pourtant M. Marcel Deprez, combinant une excitation en série et une excitation indépendante, afin de rendre constante la force électromotrice de la machine, avait montré les avantages de cette double excitation; il proposait d'ailleurs une solution du même genre pour réaliser des courants d'intensité constante. Les dispositions dues à M. Deprez et simplifiées par plusieurs constructeurs aboutirent à l'enroulement compound, utilisant à la fois pour l'excitation le courant direct et une dérivation de ce courant.

L'Exposition universelle de 1889 reçut des dynamos à courant continu de formes extrêmement variées. En Europe, la préoccupation dominante était d'accroître le rendement et la puissance sous un poids donné; certains types rendaient au delà de 90 p. 100 avec des poids compris entre 100 et 40 kilogrammes par kilowatt. Aux États-Unis, l'activité des ingénieurs s'orientait moins vers l'étude minutieuse de machines destinées à la vente que vers l'organisation et l'exploitation de vastes réseaux d'éclairage, c'est-à-dire vers des entreprises alors en plein essor dans le Nouveau Monde.

Alors que se développaient les générateurs de courant continu, aptes aux fonctions les plus diverses, commande de moteurs, charge d'accumulateurs, éclairage, galvanoplastie, les machines à courant alternatif étaient reléguées au second plan. En dehors de la dynamo

Méritens qui avait remplacé celle de l'Alliance pour le service des phares et qui y réussissait parfaitement, ces dernières machines recevaient de moins en moins d'applications malgré la simplicité de leur structure, lorsqu'un revirement se dessina en leur faveur après l'Exposition de Turin (1883). Deux faits d'une portée exceptionnelle étaient survenus : l'apparition du transformateur de Gaulard et Gibbs; le succès de la remarquable expérience de Lanzo, où des lampes fonctionnaient dans des conditions industrielles à 43 kilomètres du générateur d'électricité. Le transformateur de Gaulard et Gibbs, appareil simple, agissant sans aucune pièce mobile, permettait de modifier, notamment de réduire à volonté la force électromotrice, et de profiter dès lors des hautes tensions facilement réalisables avec les alternateurs pour le transport économique de l'énergie à grande distance, sauf à diminuer ces tensions dans la mesure voulue au lieu d'emploi et à en supprimer les dangers dans les parties accessibles du circuit. Au point de vue historique, il est bon de rappeler que, dès 1876, Jablochkoff, voulant assurer l'indépendance de bougies alimentées par des courants alternatifs, avait recouru à des bobines d'induction, dont le circuit primaire était le circuit général, tandis que le circuit secondaire de chaque bobine alimentait le foyer correspondant. Grâce à ces progrès industriels, les distributions par courants alternatifs et transformateurs en dérivation prirent un rapide développement : la force électromotrice de 2,000 à 3,000 volts directement fournie par la machine au circuit principal était ramenée par les transformateurs à 50 ou 100 volts. Il y a lieu de mentionner encore un système différent de réduction, dû au professeur Elihu Thomson et mis en pratique dans les installations de la Compagnie Thomson-Houston : ce système figurait à l'Exposition de 1889 avec divers appareils d'étude du professeur, mettant en lumière les propriétés curieuses, parfois paradoxales, des électro-aimants excités par des courants alternatifs. Quels que fussent les résultats acquis, un obstacle s'opposait encore à l'utilisation mécanique de ces courants : les réceptrices du courant monophasé étaient ou de petits moteurs à collecteurs, incapables de grandes puissances, ou des moteurs synchrones, qui ne démarraient pas spontanément. Ainsi s'explique le petit nombre des alternateurs

exposés dans les galeries de 1889 : ces machines et les générateurs de courant continu eux-mêmes n'avaient d'ailleurs qu'une puissance relativement faible.

Une véritable révolution s'est accomplie, de 1889 à 1900, par l'accroissement de puissance des unités et par la création des courants polyphasés.

Les courants polyphasés sont obtenus à l'aide d'un système de courants alternatifs simples, qui, avec des différences de phases également réparties dans la période, développent un champ magnétique tournant dans les réceptrices. Aux avantages généraux des courants alternatifs, tels que simplicité des génératrices sans collecteurs ni balais, aptitude à produire de hautes tensions et facilité de transformation, ils joignent l'avantage spécial de comporter des réceptrices à champ tournant qui peuvent être asynchrones et démarrer en charge ; si ces réceptrices n'ont pas la souplesse des dynamos à courant continu et se prêtent moins bien aux variations de vitesse, elles supportent en revanche des tensions beaucoup plus élevées (5,000 volts). C'est à la suite des travaux de MM. M. Deprez, Ferraris et Tesla, que sont nés les générateurs de courants polyphasés ; une installation faite à l'Exposition de Francfort a affirmé, en 1891, la valeur des nouveaux courants par un transport de force sur une distance de 175 kilomètres, au moyen de courants triphasés à 8,000 volts ; cette tension avait même été portée à 28,000 volts dans quelques essais spéciaux. Depuis, les transports d'énergie par courants triphasés ont pris un caractère classique ; des transformateurs augmentent la tension au départ et la diminuent à l'arrivée ; des commutatrices rotatives fournissent, s'il y a lieu, du courant continu.

Néanmoins les courants continus demeurent souvent préférables et gardent leurs adeptes, eu égard à la plus grande facilité d'isolement de leurs conducteurs, au moindre danger de leur maniement, à la souplesse des réceptrices, aux variations de puissance et de vitesse qu'admettent ces machines par suite des divers modes possibles d'excitation, à l'aisance avec laquelle elles démarrent. Les balais et les collecteurs ont bénéficié de sérieux perfectionnements. M. Thury a pu réaliser de longs transports d'énergie par courant continu : il

couple en série les génératrices, afin d'obtenir la tension nécessaire à ces transports, et les réceptrices, afin d'abaisser convenablement le voltage utilisé par chacune d'elles.

Après avoir revêtu des formes très diverses, les générateurs de courant continu tendent vers un groupement en quelques types. Leurs éléments essentiels sont : des induits disposés exceptionnellement en anneau et ordinairement en tambour, avec une carcasse en tôle à encoches et, pour les machines puissantes, un enroulement en barres rectangulaires soudées aux extrémités ; des collecteurs en cuivre dur étiré, dont les lames se trouvent isolées au mica ; des balais métalliques ou plutôt des balais au charbon, qui assurent le fonctionnement silencieux et réduisent les étincelles à la commutation ; des inducteurs multipolaires, avec carcasse magnétique en acier coulé et pôles rayonnants à la périphérie de l'induit. En 1900, la puissance des machines exposées atteignait 1,530 kilowatts et la tension aux bornes 750 volts. Les dynamos à courant constant de M. Thury produisent pratiquement 3,500 volts.

Il y avait, à l'Exposition de 1900, beaucoup d'alternateurs triphasés et très peu d'alternateurs simples ou diphasés. J'ai, précédemment, indiqué les motifs de la faveur dont jouissent les courants polyphasés ; le triphasé a été préféré jusqu'à présent au diphasé en raison de sa symétrie et des économies, peut-être plus apparentes que réelles, qu'il procure dans la canalisation.

À l'inverse des générateurs de courant continu, la plupart des alternateurs ont un induit fixe et un inducteur mobile, constituant dans beaucoup de cas le volant de la machine motrice : l'induit fixe facilite la construction, l'isolement des bobines induites et le rattachement de celles-ci aux conducteurs qui amènent le courant au tableau ; l'excitation se fait aisément à l'aide de deux bagues sur lesquelles appuient deux balais reliés à l'excitatrice. Jadis très variable, la fréquence se règle maintenant à 25, 40 ou 50 périodes par seconde, selon la nature du service. L'un des alternateurs exposés produisait directement 30,000 volts ; mais la limite pratique semble être de 12,000 ou 15,000 volts ; pour les tensions supérieures, on a recours à des transformateurs élévateurs de tension.

Naguère, tous les alternateurs comportaient un inducteur à pôles permanents; la fréquence était définie par la vitesse angulaire et le nombre des pôles. Récemment, les travaux de MM. Maurice Leblanc, Boucherot, Marius Latour, Heyland, etc., ont donné naissance à des alternateurs de construction plus complexe, où la période du courant ne dépend pas seulement de la vitesse de rotation et qui sont dits asynchrones, par opposition aux premiers, dénommés synchrones.

Les alternateurs synchrones restent jusqu'ici les seuls nombreux. Ils ont des induits dentés; habituellement, les conducteurs sont faits de barres logées dans des encoches, au nombre de 1 à 5 par pôle et par phase, et réunies par des développantes, les barres d'une même phase se reliant en tension et constituant, dans le cas des triphasés, trois enroulements d'ordinaire couplés en étoile; pour les alternateurs à haute tension, les conducteurs consistent souvent en fils qui traversent les tôles dans des tubes isolants. On distingue : les inducteurs à flux tournant alternant ou hétéropolaires, dans lesquels le flux change de signe pour chaque bobine induite autant de fois par tour qu'il y a de pôles inducteurs; les inducteurs à flux tournant ondulant ou homopolaires, dans lesquels le flux traversant chaque bobine induite change de grandeur sans changer de signe; les inducteurs à réluctance variable ou à fer tournant, aujourd'hui abandonnés, dans lesquels les variations de flux, alternant ou ondulant, étaient produites par le déplacement d'armatures en matière magnétique n'ayant aucune excitation propre. Qu'ils appartiennent à la première ou à la seconde catégorie, les inducteurs peuvent être à pôles pleins, à épanouissements polaires feuilletés ou à pôles feuilletés, suivant la nature de l'induit qu'ils magnétisent. MM. Hutin et Leblanc ont imaginé des amortisseurs, appliqués aux pièces polaires des inducteurs pour courants alternatifs simples, en vue de réduire la réaction d'induit et de maintenir le synchronisme dans la marche en parallèle, malgré la valeur relativement élevée du coefficient d'irrégularité des moteurs qui actionnent les alternateurs.

Des excitatrices à courant continu doivent être adjointes aux alternateurs : ceux-ci ne peuvent, en effet, créer eux-mêmes leur champ magnétique. Les dynamos auxiliaires d'excitation dépendent de l'alter-

nateur ou en sont indépendantes. Si la première combinaison est plus simple, elle a le défaut de diminuer le courant d'excitation dans l'inducteur et la tension de l'alternateur, dès que celui-ci se ralentit.

MM. Hutin et Leblanc, d'une part, et Boucherot, d'autre part, ont imaginé des excitatrices compoundeuses qui maintiennent automatiquement une tension uniforme, malgré les variations du débit et le déphasage du courant.

La puissance apparente maximum des alternateurs exposés en 1900 était de 3,000 kilovolt-ampères.

Certains générateurs sont polymorphiques et peuvent fournir à la fois des courants de plusieurs formes, par exemple du courant continu et des courants alternatifs simples ou triphasés.

2. Transformateurs. — Les transformateurs se rangent en deux catégories : transformateurs homomorphiques, qui modifient les éléments, tension et intensité, d'un courant électrique, sans en changer la forme; transformateurs hétéromorphiques, qui modifient la forme du courant et, éventuellement, ses éléments.

Généralement, la transformation homomorphique du continu se fait à l'aide de moteurs générateurs : une dynamo, remplissant l'office de moteur, reçoit le courant primaire et actionne une seconde dynamo d'où sort le courant secondaire. Divers dispositifs spéciaux portent le nom de survolteurs, dévolteurs, régulatrices, compensatrices, d'après la fonction à laquelle ils sont destinés.

Les transformateurs homomorphiques de courants alternatifs simples sont constitués par un circuit magnétique en feuilles de tôle et deux circuits électriques ordinairement en cuivre, l'un inducteur, l'autre induit, entourant le circuit magnétique. On établit aujourd'hui ces transformateurs avec des puissances atteignant 2,500 kilowatts et des tensions de 20,000 à 30,000 volts pour les applications industrielles, de 50,000 et 100,000 volts pour les essais de câbles et d'isolateurs.

Deux transformateurs à courants alternatifs simples réalisent la transformation homomorphique des courants diphasés : l'un de ces appareils est alimenté par le circuit sinus, l'autre par le circuit cosinus.

Pour le triphasé, les appareils se composent en principe de trois noyaux magnétiques à axes parallèles, réunis par des culasses, sur lesquels sont disposées les bobines inductrices et induites.

Souvent, le courant triphasé qui doit être transformé en continu par une commutatrice subit avantageusement une première transformation en hexaphasé. Cette transformation auxiliaire augmente dans une proportion considérable la puissance des commutatrices. Elle s'opère aisément au moyen de transformateurs homomorphiques du triphasé; plusieurs couplages du secondaire donnent le résultat voulu.

La transformation hétéromorphe des courants alternatifs simples ou polyphasés en courant continu est obtenue à l'aide, soit de moteurs générateurs, soit de commutatrices ou convertisseurs, soit de permutatrices. Dans le premier cas, l'appareil comporte un moteur synchrone ou asynchrone à courants alternatifs actionnant une dynamo à courant continu. Les commutatrices sont faites d'un induit placé dans un champ magnétique, auquel des bagues convenablement reliées à l'enroulement amènent le courant alternatif; elles ne diffèrent des dynamos que par leurs proportions et par l'adjonction de ces bagues; le démarrage et, s'il y a lieu, le changement de la tension aux balais exigent l'emploi de dispositifs ou d'artifices auxiliaires. Enfin les permutatrices, spéciales aux courants polyphasés, utilisent un organe de transformation et un organe de commutation ou de permutation; elles laissent fixes les éléments qui sont le siège de phénomènes d'induction et ne font tourner que ceux de redressement, de commutation ou de permutation des connexions nécessaires à la transformation.

Il suffit de signaler quelques autres appareils : redresseurs des courants alternatifs simples; polyphaseurs, maintenant la fréquence des courants, mais modifiant leurs phases; transformateurs de fréquence, transformant les courants alternatifs d'une fréquence donnée en courants alternatifs d'une fréquence différente.

3. Moteurs électriques. — Une des caractéristiques de l'Exposition de 1900 a été le développement considérable des moteurs électriques et de leurs applications; le progrès s'accusait surtout pour les

moteurs à courants alternatifs simples ou polyphasés. Nous sommes loin des premières tentatives de Jacobi pour la propulsion des bateaux par l'électricité (1839), loin aussi du moteur que Froment utilisa longtemps dans ses ateliers d'instruments de précision, loin encore de la situation lors de notre première Exposition universelle (1855) : le jury d'alors évaluait le poids des meilleurs électromoteurs à 800 kilogrammes par cheval et la dépense correspondante de zinc à 2 kilogrammes par heure.

Comme je l'ai rappelé, les générateurs mécaniques d'électricité sont réversibles. Pacinotti l'avait établi expérimentalement. M. Fontaine en a donné une belle démonstration pratique à l'Exposition de Vienne (1873), où il actionnait une pompe par une dynamo réceptrice Gramme de constitution identique à celle du générateur. Cependant, en fait, les conditions du travail des moteurs leur font attribuer souvent des dispositions spéciales.

Pour le courant continu, les moteurs de faible puissance présentent habituellement un induit en anneau, des balais en charbon, une bobine d'excitation unique sur la culasse (série ou dérivation), des graisseurs automatiques à bagues, etc. La plupart des moteurs devant fonctionner à vitesse constante sont excités en dérivation; l'enroulement série est préféré, en ce qui concerne les appareils de levage, les tramways, les automobiles, par suite de l'intensité du couple moteur qu'il donne au démarrage. Dans certaines industries, notamment dans l'industrie des mines, où le contact des étincelles avec le milieu ambiant pourrait offrir du danger, on enferme le moteur dans un carter ventilé ou maintenu sous pression pour que les gaz de la mine ne puissent atteindre le collecteur. Le démarrage et le réglage des moteurs alimentés à potentiel constant dépendent du mode d'excitation : c'est ainsi qu'un rhéostat de démarrage doit être intercalé dans le circuit de l'induit des moteurs shunt. De construction récente, les moteurs d'automobiles ont provoqué des études attentives; ils satisfont à diverses conditions rigoureuses : grande puissance spécifique, rendement élevé à toutes charges, résistance aux courants excessifs, aux à-coups, aux chocs, aux trépidations, aux intempéries, aux arrosages intempestifs. Ceux des tramways, qui ne remontent également qu'à

quelques années, se sont rapidement développés et uniformisés; leurs inducteurs en acier coulé forment carter; chaque voiture porte deux moteurs, en vue de permettre le couplage série-parallèle et de réduire la consommation pendant les périodes de démarrage; un combinateur, placé sous la main du wattman, réalise les connexions voulues entre les différents organes.

Une classification usuelle pour les courants alternatifs consiste à distinguer les moteurs synchrones ou à champ constant et les moteurs asynchrones à champ alternatif ou à champ tournant. Les moteurs synchrones ont en général leur inducteur fixe et leur induit mobile; la simplicité de leur construction et l'élévation de leur rendement ne compensent malheureusement pas les inconvénients qui en restreignent l'emploi: démarrage difficile, décrochage en cas de surcharge brusque, oscillations perturbatrices dans le réseau quand la fréquence des alternateurs varie, harmoniques compromettant la stabilité de marche, etc. D'un usage beaucoup plus répandu, les moteurs asynchrones se caractérisent principalement par la faculté de fonctionner avec une vitesse différente de celle du synchronisme, avec un glissement fonction de la charge; ils sont dits de conduction ou d'induction, suivant que le circuit induit est traversé ou non par le courant d'alimentation. Les moteurs d'induction, préférés aux autres, peuvent être eux-mêmes munis ou non d'un collecteur; en 1900, la première forme était délaissée. Dans les moteurs à induit fermé sur lui-même, un système inducteur en général fixe reçoit le courant du réseau et développe un champ ou une série de champs, alternatifs ou tournants; le système induit mobile est en cage d'écureuil ou bobiné et, dans ce dernier cas, pourvu d'un dispositif permettant l'introduction de résistances variables afin de faciliter le démarrage par un accroissement du couple moteur: il y a là un problème technique dont le rapport de M. Michel Lévy et celui de M. Hospitalier sur l'Exposition de 1900 indiquent d'une manière précise les diverses et ingénieuses solutions.

Les moteurs électriques reçoivent déjà d'innombrables applications, et pourtant ils n'en sont qu'à leur début.

Nous les voyons largement employés pour la traction des tramways.

Ils commencent également à l'être pour la traction sur les chemins de fer; à cet égard, un avenir magnifique leur paraît réservé; dès aujourd'hui, ils servent fréquemment à la manœuvre des aiguilles, des signaux, des plaques tournantes, des wagons, des appareils de levage, etc.

L'outillage d'exploitation des ports maritimes, grues, bigues, cabestans, ponts tournants, etc., est aussi leur tributaire. Ils fournissent aux navires d'excellents servo-moteurs; l'artillerie navale y a recours pour ses tourelles et ses canons. Les ports fluviaux et les installations de touage sur les voies navigables leur offrent également des débouchés.

De plus en plus, ils envahissent les ateliers de construction mécanique, soit comme moteurs fixes, soit comme moteurs transportables. La tendance actuelle est de donner un moteur spécial à chaque outil, de l'y incorporer sans transmission. À l'Exposition de 1900 figurait une riveuse capable d'exercer un effort de 40 tonnes; sa production atteignait 1,200 rivures par heure.

Les moteurs électriques concourent utilement à l'exploitation des mines pour la ventilation, la perforation, les transports. Ils ne rendent pas moins de services dans le percement des souterrains.

On les trouve commandant les métiers de filature ou de tissage, réalisant avec aisance le démarrage et les mouvements de ces métiers, augmentant dans des proportions sensibles le travail utile.

Ils actionnent les ascenseurs et les monte-charge.

La dernière Exposition montrait un type de régulateur à frein électrique pour turbine, fondé sur la résistance qu'oppose au mouvement une masse métallique soumise à l'influence d'un champ magnétique. Un rhéostat placé sous la dépendance d'un régulateur à boules fait varier l'excitation, l'intensité du champ magnétique et par suite le couple résistant.

Rien ne serait plus facile que de multiplier les exemples. Mais ceux qui précèdent suffisent à attester l'immense étendue de la carrière ouverte aux moteurs électriques.

4. Distribution, transmission et transport de l'énergie électrique.

— Quand les appareils consommateurs sont répartis à faible distance

de l'usine génératrice, l'énergie électrique leur est distribuée directement sous forme de courant continu à potentiel constant, 110 à 220 volts, avec un pont unique (110 volts), deux ponts et trois fils (220 volts), quatre ponts et cinq fils (440 volts). Ordinairement, la mise en service des gros générateurs se fait par une colonne de commande placée près de la dynamo; cette colonne porte les appareils de mesure, un volant agissant sur l'excitation de la machine et un levier actionnant l'interrupteur général; au-dessous sont le rhéostat et l'interrupteur. Un tableau à dalle de marbre blanc, recevant les canalisations, est muni des instruments de mesure, ainsi que des appareils interrupteurs, commutateurs, coupe-circuits, etc.; les connexions s'opèrent par la face postérieure; toutes les précautions doivent être prises pour éviter les accidents de personnes, pour donner au besoin un isolement propre aux diverses parties conductrices du courant, pour empêcher les fusibles d'allumer un arc permanent, pour chamber le siège possible des étincelles.

Lorsque la distance entre l'usine génératrice et les appareils de consommation augmente sans être très considérable, on transmet l'énergie à haute tension, généralement sous forme de courants alternatifs simples, et on la fait passer par des transformateurs, isolés ou groupés selon les cas, qui réduisent la tension dans un réseau secondaire de distribution; le groupement des transformateurs peut exceptionnellement motiver une sous-station. Il est d'usage d'établir les réseaux secondaires à 110 volts, 220 volts, deux fois 110 volts ou deux fois 220 volts, suivant leur importance.

Souvent, l'énergie doit être transportée au loin. J'ai, précédemment, cité plusieurs installations célèbres affectées à de tels transports. Mais il serait injuste de ne pas rappeler ici les expériences retentissantes faites en 1886 par M. Marcel Deprez entre Paris et Creil, sur une distance de 50 kilomètres, et celles dans lesquelles, au cours de la même année, M. Fontaine transmet, avec un rendement total de 52 p. 100, une puissance de 60 chevaux, à travers un fil dont la résistance égalait celle du circuit de Creil. Aujourd'hui, les longs transports s'effectuent soit par courants alternatifs polyphasés à potentiel constant, soit par courant continu à intensité constante; dans les deux systèmes,

le courant arrive à une ou plusieurs sous-stations où il est transformé.

Les courants polyphasés ont, sur les courants alternatifs simples, l'avantage de se prêter à une transformation facile en courant continu, à l'aide de commutatrices ou de permutatrices : avec les courants polyphasés, en effet, comme avec le courant continu, la puissance électrique mise en jeu à chaque instant est constante, tandis qu'elle est périodique dans les courants alternatifs simples, ce qui subordonne la transformation à l'emploi de procédés d'emménagement mécanique ou électrique pendant la période d'oscillation. À égalité de puissance et de tension entre fils, le triphasé économise 25 p. 100 du cuivre qu'exigerait le diphasé pour la canalisation; mais la supériorité du triphasé ne se maintient pas, quand on considère la tension entre fils et terre. Peu à peu, la tension a été élevée jusqu'à 50,000 volts; bien que les générateurs puissent fournir 15,000 volts, on ne leur en demande habituellement guère plus de 5,000 et on réalise la tension élevée par des transformateurs élévateurs situés à l'usine génératrice. Les deux fréquences normales sont de 25 ou 50 périodes par seconde. Chaque groupe électrogène est relié au tableau par une colonne ou un kiosque de commande, avec instruments de mesure, interrupteur et volant agissant sur l'excitation. En général, le tableau se compose de deux parties parallèles, réservées l'une aux alternateurs, l'autre aux feeders ou aux conducteurs de transport. Parmi les installations représentées à l'Exposition de 1900, était celle du transport de la Vézère à Limoges : longueur de 75 kilomètres; tension de 20,000 volts; puissance recueillie à Limoges, de 750 kilowatts.

M. Thury, de Genève, a inauguré en 1890 le système de transport par courant continu, sur un circuit de 48 kilomètres et pour une puissance de 110 kilowatts. Lorsque les moteurs actionnant les dynamos génératrices fonctionnent à vitesse constante, le réglage de l'intensité constante du courant primaire se fait par variations du champ; dans le cas contraire, les rhéostats et les excitatrices sont supprimés, les génératrices série subsistent seules sans autre appareil qu'un interrupteur de court-circuit, et le réglage est opéré à la main ou automatiquement. On maintient l'uniformité de vitesse des moteurs par déca-

lage des balais, par shuntage des inducteurs, par shuntage combiné avec le décalage des balais, par montage de couples secondaires en dérivation sur les balais.

Le cuivre dur et le bronze phosphoreux ou silicieux sont les principales matières employées pour les canalisations. Aujourd'hui, cependant, on recourt à l'aluminium, surtout aux États-Unis, grâce à l'abaissement du prix de ce métal.

Dans les canalisations aériennes, des poteaux reçoivent les conducteurs par l'intermédiaire d'isolateurs en verre ou en porcelaine. Il peut être utile d'armer ces poteaux de petits filets en fer mettant les conducteurs à la terre, s'ils viennent à se rompre, et d'établir des filets continus à la traversée des routes, des chemins de fer ou des centres de population. La ligne est protégée au moyen de parafoindres, distants, par exemple, de 2 kilomètres. Des interrupteurs la divisent en sections, afin de permettre le contrôle et l'isolement des tronçons sur lesquels se produirait un accident.

Les canalisations souterraines doivent être recouvertes d'une enveloppe isolante; eu égard à la cherté du caoutchouc, on lui substitue souvent d'autres isolants, tels que le papier comprimé. Une protection mécanique s'impose aussi dans nombre de cas. Le réseau de l'Exposition universelle de 1900 comprenait des câbles armés à trois conducteurs; ces conducteurs, isolés au jute et toronnés, étaient recouverts d'une gaine de plomb, d'un matelas de filin et d'une armature métallique, constituée elle-même par deux rubans de fer en hélice. Des boîtes de jonction, de branchement, de coupure et d'intervention, s'il y a plusieurs câbles, sont réparties sur les canalisations souterraines.

Partout les constructeurs ont créé de nombreux dispositifs simples et pratiques pour l'appareillage et la distribution de l'énergie électrique.

§ 2. ÉLECTRO-CHIMIE.

1. Piles. — Le XVIII^e siècle finissait quand fut inventée par Volta la première pile, dite à colonne; cette pile se composait d'une suite de rondelles en cuivre, en zinc et en drap imbibé d'eau légèrement acidulée A.-C. Becquerel, à qui l'électricité est redevable d'une magnifique contribution, établit les lois générales du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques, modifia la théorie admise pour la pile de Volta, expliqua le phénomène de la polarisation, donna le moyen de supprimer ce phénomène dans les piles et créa, en 1829, les piles à courant constant, formées de deux métaux qui plongeaient dans deux liquides séparés par un diaphragme poreux : cette dernière disposition fut reproduite sept ans plus tard (1836) dans la pile de Daniell (cuivre et zinc amalgamé, sulfate de cuivre et acide sulfurique étendu). En 1835, A.-C. Becquerel indiqua encore l'emploi de l'acide nitrique au pôle positif d'une pile ne comprenant qu'un métal, le platine, et deux liquides; son indication ne tarda pas à être utilisée dans les piles de Grove (zinc amalgamé et platine, acide sulfurique étendu et acide azotique, 1839) et de Bunsen (mêmes éléments, sauf substitution du charbon au platine, 1843). Grove, que je viens de citer, imagina aussi la pile à gaz.

Depuis longtemps, les dépolarisants solides, notamment le peroxyde de manganèse, étaient signalés pour la construction des piles. Zamboni avait établi, en 1812, une pile sèche fonctionnant par l'action de l'humidité de l'air sur le peroxyde de manganèse. Après 1834, les travaux de A.-C. Becquerel, de la Rive, Munk, Schœnbein et Matteucci montrèrent bien le rôle susceptible d'être joué par les peroxydes de manganèse ou de plomb, qui, subissant une réduction lente, peuvent servir de dépolarisateurs à l'électrode positive et augmenter la force électromotrice du couple. Les piles au peroxyde de manganèse, grâce à leur simplicité et à l'absence d'émanations acides, jouirent d'une légitime faveur dès que M. Leclanché leur eut donné un caractère pratique, en combinant l'action dépolarisante du peroxyde avec l'action du chlorhydrate d'ammoniaque sur le zinc (1870).

Sans développer cet historique, sans mentionner divers systèmes de piles aujourd'hui abandonnés, je passe immédiatement à la situation vers la fin du siècle.

Les piles ont généralement fait place aux accumulateurs pour la production des courants de quelque puissance. Cependant l'usage s'en est maintenu dans la télégraphie, la téléphonie, l'exploitation des chemins de fer; elles actionnent les sonneries domestiques. Le perfectionnement principal réalisé au cours des dernières années consiste dans l'immobilisation des liquides par des substances spongieuses ou colloïdales : à cet égard, Volta avait ouvert la voie avec ses rondelles de drap.

On a revu à l'Exposition de 1900 la pile Daniell-Callaud heureusement modifiée : le dispositif en rigoles adopté pour l'électrode positive permet de recueillir le cuivre électrolytique et de réduire ainsi le prix de l'énergie électrique, qui descendrait à 1 fr. 50 le kilowatt-heure ou à 0 fr. 05 l'heure d'une lampe de 10 bougies.

La pile Leclanché (chlorhydrate d'ammoniaque, zinc, charbon et peroxyde de manganèse) réapparaissait modifiée par l'addition dans le liquide excitateur d'une petite quantité de chlorure de zinc, afin de régulariser l'usure du métal. Une variante de cette pile comportait l'immobilisation du liquide. Les piles dites sèches, quoique humides à l'intérieur, étaient en outre représentées par les piles Bloc et Hellesen, dérivées du système Leclanché. Dans le type Bloc, la substance spongieuse est la cellulose de noix de coco, capable d'absorber un volume de liquide égal au sien; après cinquante jours de décharge au travers d'une résistance de 10 ohms, la force électromotrice n'accuse pas une réduction de 30 p. 100.

Parmi les autres piles exposées figuraient : des piles au bichromate de potasse, fournissant 1 volt 8 à 1 volt 9 et améliorées au point de vue de la constance de leur courant par l'addition de dépolarisants tels que le sulfate de fer et le sulfate de soude; les piles à oxyde de cuivre et dissolution de potasse, remarquables par leur très faible résistance et capables de débiter jusqu'à 100 ampères; etc.

2. Accumulateurs. — Pendant le fonctionnement des piles, les électrodes peuvent subir le phénomène de la polarisation; leur surface

se modifie et il s'établit entre elles une différence de potentiel, dite *force électromotrice de polarisation*. Si, après que le courant a cessé, on réunit par un fil conducteur les deux électrodes polarisées, elles restituent l'électricité qui avait servi à la polarisation; un courant secondaire prend ainsi naissance.

Gautherot observa, le premier, ce courant secondaire en 1801. Ritter, à la suite d'observations analogues, construisit la première pile secondaire (1803). Puis vinrent des études de Volta, Marianini, A.-C. Becquerel, de la Rive, Matteucci, Grove, etc. : la pile à gaz de Grove était fondée sur la polarisation.

Planté, ayant repris la question, remarqua en 1859 l'intensité et la durée des courants secondaires obtenus par la polarisation du plomb dans l'eau acidulée; il constata, d'ailleurs, que cette durée croissait avec la quantité de peroxyde formée au pôle positif, c'est-à-dire avec le temps de service des piles. De là, l'idée d'une « formation » des électrodes par charges et décharges successives et nombreuses : la charge transforme plus ou moins profondément la lame positive en bioxyde de plomb et provoque le dégagement d'hydrogène à l'électrode négative ou la réduction de cette électrode si elle est préalablement oxydée, ce qui rend le métal spongieux. Au moment de la charge, la force électromotrice atteint 2 volts 6; elle tombe et prend une valeur constante de 2 volts durant presque toute la période de débit, puis descend rapidement; on arrête en général le fonctionnement, dès que le voltage s'est abaissé à 1 volt 8. Planté avait ainsi créé les accumulateurs, qui toutefois ne reçurent qu'ultérieurement cette dénomination. D'abord chargés par des piles, les appareils le furent ensuite par des générateurs mécaniques d'électricité et entrèrent dès lors dans le domaine de la pratique (1880).

Les accumulateurs emmagasinent l'électricité, puis la restituent. Grâce à cette propriété, ils servent utilement, soit de régulateurs et de volants, dans les stations électriques à débit variable ou intermittent, soit de sources d'électricité fixes ou transportables, notamment pour les tramways et les automobiles.

Afin de remédier à la lenteur et au prix de la formation Planté, Faure imagina un procédé rapide consistant à déposer sur les lames

de plomb des oxydes de ce métal, que la première charge transformait d'un côté en peroxyde et de l'autre en plomb très divisé (1880). La difficulté est d'assurer l'adhérence des matières actives sur les plaques et par suite la durée des accumulateurs : de grands efforts ont été faits pour y parvenir.

Souvent, on a combiné les deux systèmes, en appliquant la formation Planté aux plaques positives et en couvrant d'oxydes rapportés les plaques négatives, sujettes à un moindre foisonnement.

Aujourd'hui, les accumulateurs se divisent en trois catégories principales : accumulateurs genre Planté pur; accumulateurs à oxydes rapportés sur les deux plaques; accumulateurs mixtes. Dans les uns et les autres, les supports en plomb qui ne doivent pas subir de déformation sous l'influence de l'attaque par l'électrolyse de l'eau acidulée sont ordinairement en plomb antimonié. Les supports en plomb pur de certains modèles à oxydes rapportés se forment progressivement en Planté par l'usage et se substituent alors aux matières actives rapportées, ce qui prolonge la durée des plaques.

De nombreux exposants d'accumulateurs participaient à l'Exposition universelle de 1900. Beaucoup offraient des dispositions très ingénieuses pour le développement des surfaces actives et pour la fixation des matières rapportées.

Sans passer en revue les diverses variétés d'appareils, il ne sera pas inutile de citer quelques exemples. Certaines plaques du genre Planté pesaient 3 kilogrammes par mètre carré de surface active efficace, avaient une capacité dépassant 10 ampères-heure et pouvant atteindre 14 ampères-heure par kilogramme, rendaient 0.75 ou 0.82 en énergie et 0.90 ou 0.95 en quantité suivant que le régime de décharge était de 1 ampère ou 1/2 ampère par kilogramme. Des plaques du type Faure donnaient par kilogramme un débit spécifique de 3 ampères avec une capacité de 15 ampères-heure; 37 kilogr. 5 fournissaient un kilowatt-heure et 27 kilogrammes alimentaient un cheval-vapeur-heure. Pour d'autres accumulateurs du même système, les vérifications accusaient une capacité par kilogramme de 21 ampères-heure au régime de 2 ampères et de 7 ampères-heure 88 au régime de 7 ampères 9.

Malgré leurs défauts et notamment leur poids, les accumulateurs reçoivent déjà de multiples applications; leur fabrication, leur formation et leur entretien font l'objet d'une industrie puissante. Cette industrie ne prendra néanmoins tout son essor qu'après la découverte d'appareils légers, résistants, susceptibles de décharges rapides et variées. Les savants et les praticiens ont entrepris et poursuivent des recherches dans différentes voies. Parmi les éléments nouveaux mis à l'essai se placent : l'élément zinc-oxyde de cuivre à électrolyte alcalin, l'élément nickel-fer d'Edison, l'élément argent-cadmium. Le dernier de ces trois éléments se recommande par des qualités sérieuses, car il se prête à une décharge complète et 1 kilogramme d'argent équivaut à 8 kilogrammes de plomb; malheureusement, le prix est élevé.

3. *Électrolyse.* — La *galvanoplastie* proprement dite, ou reproduction d'objets quelconques par un dépôt électrolytique et non adhérent de métal, constitue une branche importante de l'électrochimie. Jacobi (Russie) et Spencer (Angleterre) l'inventèrent simultanément en 1838; tous deux reproduisirent des modèles placés à la cathode dans un bain de sulfate de cuivre. Mais Jacobi poussa les applications plus loin que son émule et réalisa de nombreux progrès successifs. On lui doit notamment l'emploi comme anode d'une lame de cuivre, dont la dissolution maintenait la concentration du bain, et l'idée d'enduire de plombagine les corps non conducteurs, afin de les rendre aptes à recevoir les dépôts. Cette dernière conception permit l'usage de moules en plâtre stéariné, en gélatine, en gutta-percha. D'abord limitée aux bas-reliefs, la galvanoplastie ne tarda pas à s'étendre aux rondes-bosses; après avoir procédé par morceaux, qui étaient ensuite assemblés et soudés, les praticiens purent opérer sur des moules complets, grâce à Lenoir et à Planté; MM. Christoffe furent ainsi en mesure d'exécuter des ouvrages considérables, tels qu'une statue mesurant 9 mètres de hauteur. Les couches de pareille étendue n'ayant pas une épaisseur uniforme, M. H. Bouilhet imagina d'en corriger les inégalités et de les renforcer en coulant du laiton dans la coquille galvanoplastique. Si le cuivre est le métal le plus employé

et le plus facile à obtenir en couche épaisse, rien n'empêche de recourir à d'autres métaux. En dehors des reproductions artistiques, la galvanoplastie rend de multiples et utiles services à l'industrie, par exemple pour la préparation des clichés de gravure, de photogravure, de typographie; M. H. Bouilhet a augmenté la résistance des clichés au moyen d'un dépôt préalable de nickel, qui se double d'un dépôt de cuivre.

Vers 1840, Elkington et de Ruolz inaugurèrent la *dorure* et l'*argenture* électro-chimiques; MM. Christoffe en firent une industrie de premier ordre. Les dissolutions employées sont des cyanures doubles alcalins d'or ou d'argent. Pour la dorure, l'addition de cyanure de cuivre ou de cyanure d'argent donne des tons d'or rouge ou d'or vert; le dépôt électrolytique, sur l'or, d'une petite quantité de mercure qu'on évapore ensuite, imprime aux objets l'éclat particulier des anciennes dorures au mercure. L'argenture des alliages de cuivre nécessite une immersion préparatoire de quelques secondes dans une solution étendue de nitrate de mercure; celle du fer ou du nickel exige le dépôt d'une mince couche de cuivre sur ces métaux; l'aspect vieil argent s'obtient par une sulfuration ou une chloruration de la surface.

Le *nickelage* au moyen du sulfate double de nickel et d'ammoniaque a été indiqué par A.-C. Becquerel, Ed. Becquerel et de Ruolz.

Un procédé efficace pour protéger le fer et la fonte contre l'action oxydante de l'humidité consiste à les *cuvrer*. Dans la méthode Oudry, on commence par appliquer une peinture imperméable et plombaginée; le cuivrage se fait aussi directement à l'aide de bains alcalins.

L'*aciérage* électro-chimique des clichés et des rouleaux d'impression augmente leur résistance et leur durée. Un dépôt de nickel doublé de cuivre peut remplacer le fer.

Si intéressantes que soient la galvanoplastie et les opérations du même ordre, leur rôle s'est presque effacé devant l'énorme développement des fabrications d'alcalis et de sels alcalins par l'électrolyse.

Ce développement a été connexe de celui des usines hydrauliques créées pour la production de l'énergie électrique. D'après une statistique résumée dans le rapport de M. Michel Lévy sur l'industrie à l'Exposition de 1900, les industries électrolytiques utilisaient, au commencement du xx^{e} siècle, 372,000 chevaux, dont 330,000 chevaux hydrauliques, et donnaient 82,000 tonnes de soude caustique, 17,000 tonnes de potasse, 256,000 tonnes de chlorure de chaux, 215,000 tonnes de chlorate de chaux, 7,000 tonnes de chlorate de potasse, etc.

Les deux matières premières qui forment la base de ces industries sont le chlorure de potassium et surtout le chlorure de sodium. Ce dernier sel sera pris pour exemple dans l'indication du principe des réactions. L'électrolyse d'une solution aqueuse de chlorure de sodium fournit, à la cathode, du sodium et de l'hydrogène, tandis qu'à l'anode se dégagent du chlore et de l'oxygène; au contact avec l'eau, le sodium se transforme en soude et il y a un nouveau dégagement d'hydrogène. Quand on veut recueillir tels quels l'alcali caustique et le chlore, les produits obtenus aux deux électrodes doivent être empêchés de réagir les uns sur les autres; divers procédés peuvent assurer ce résultat, spécialement l'interposition d'un diaphragme poreux entre l'anode et la cathode, l'amalgamation à la cathode du sodium qui sera ensuite retiré par un lavage à l'eau, la formation à la cathode d'un alliage de plomb et de sodium qu'un traitement par l'eau décomposera ultérieurement; le chlore gazeux est utilisé pour fabriquer du chlorure de chaux. Lorsque, au contraire, les éléments chlore, hydrogène, oxygène et soude restent en présence, des réactions dépendant de la température, de la densité du courant et de l'alcalinité de la solution peuvent prendre naissance : formation d'hypochlorite par l'action du chlore sur la soude; formation de chlorate par l'oxydation de l'hypochlorite; électrolyse de l'hypochlorite avec formation de soude, d'acide hypochloreux et d'oxygène, ou réduction des hypochlorites, ou encore réduction du chlorate; il peut aussi se former des perchlorates. Pour l'anode, on a recours au platine, à un alliage de platine et d'iridium ou au charbon, qui cependant ne résiste pas aux combinaisons oxygénées du chlore et, dès lors, n'est point

d'un usage général; toutes les substances métalliques conviennent pour la cathode.

Comme la chimie, la métallurgie trouve dans l'électrolyse un précieux auxiliaire. Dès 1866, Elkington avait indiqué le principe du raffinage électrolytique des métaux. Mais sa méthode n'a pu se généraliser qu'après la création des machines dynamos. Elle reçoit une application extrêmement importante pour le cuivre : le tonnage de ce métal ainsi raffiné a atteint, pendant l'année 1900, 172,000 tonnes aux États-Unis et 37,000 tonnes en Europe. Le cuivre brut contient, entre autres impuretés, du fer, de l'argent, de l'or, de l'oxydure. On le prend pour anode dans l'électrolyse d'un bain de sulfate de cuivre : si la force électromotrice est faible, le fer se dissout dans le bain, l'argent et l'or tombent au fond de la cuve, le cuivre pur se dépose sur la cathode. L'état du métal déposé varie avec la densité du courant, l'alcalinité ou l'acidité du bain, sa concentration, sa température, la présence de sels étrangers; des actions mécaniques (brunissage à l'agate, mise en mouvement de l'électrolyte, etc.) augmentent la cohésion du dépôt. Parmi les qualités du cuivre pur, l'une des plus essentielles est sa haute conductibilité électrique, très supérieure à celle du cuivre souillé par l'oxydure.

Les visiteurs de l'Exposition de 1900 voyaient au Trocadéro une petite usine où l'or était extrait du minerai par le procédé Siemens, c'est-à-dire par le traitement au cyanure de potassium et l'électrolyse. Ce procédé est passé, en 1893, de la Transylvanie au Transvaal. Tous les minerais ne s'y prêtent pas; il est souvent nécessaire de les soumettre à des opérations préalables, notamment à l'amalgamation. Les anodes sont en fer et les cathodes en plomb.

4. Fours électriques. — Bien que les fours électriques soient, en nombre de cas, le siège de phénomènes d'électrolyse, une étude distincte doit leur être consacrée, car la chaleur y joue un rôle toujours prépondérant et souvent exclusif.

Davy, obtenant pour la première fois, en 1813, l'arc électrique entre deux pointes de charbon, constata que les matières les plus réfrac-

taires entraient en fusion à la température de cet arc. Jacquelin y observa la transformation du diamant en coke (1847). Despretz se livra, en 1849 et 1850, à une série de remarquables expériences dans le vide, dans des gaz divers, à des pressions variables, en combinant avec l'arc d'autres sources de chaleur; il convertit en graphite les diverses variétés de charbon de même que le diamant et exprima l'opinion que la seule action d'une chaleur intense ne devait pas suffire à la formation de ce dernier corps. Les recherches furent continuées par Fizeau, Foucault et M. Berthelot, qui réalisa la mémorable synthèse du gaz acétylène. Du laboratoire, l'arc passa dans le domaine industriel comme source calorifique, pour la fabrication de l'aluminium. Puis vinrent les travaux admirables et décisifs de M. Moissan : ces travaux provoquèrent le magnifique essor actuel de l'industrie électrochimique et apportèrent de larges conquêtes à la chimie minérale.

M. Moissan construisit, en 1892, des fours dans lesquels il s'attacha à éviter l'électrolyse, à la séparer nettement des effets de la chaleur, et où il atteignit la température de 3,500 degrés, alors qu'antérieurement la limite ne dépassait guère 1,800 degrés pour les fours en usage et 2,000 degrés pour le chalumeau à gaz d'éclairage et oxygène. Un bloc de chaux vive, évidé et recouvert d'un dôme également en chaux vive, recevait deux charbons horizontaux entre lesquels jaillissait l'arc; la matière à traiter était placée dans une cavité inférieure. Grâce aux appareils ainsi conçus, M. Moissan put étudier méthodiquement les trois variétés de carbone; reconnaissant que la pression avait dû intervenir pour la cristallisation du charbon, il imagina de mettre à profit l'augmentation de volume éprouvée par la fonte lors de son passage de l'état liquide à l'état solide, satura de carbone une certaine quantité de fonte liquide, la refroidit brusquement, reproduisit de la sorte le diamant noir et le diamant transparent sous ses différentes formes naturelles. Le nouveau four permit aussi à cet éminent chimiste de se livrer aux plus intéressantes observations sur les changements d'état des corps, de volatiliser tous ceux qui étaient regardés comme réfractaires, de généraliser des réactions naguère limitées, d'arriver à la décomposition d'oxydes réputés irréductibles, de produire et d'affiner des métaux à peine entrevus, d'aborder des

séries inexplorées de composés cristallins, borures, siliciures et carbures, enfin de jeter la lumière sur la formation géologique des carbures gazeux naturels.

Du four de M. Moissan, il y a lieu de rapprocher le four Siemens, très antérieur (1879), mais répondant à un ordre d'idées tout différent et destiné à l'électrolyse des métaux fondus ou simplement à la fusion. Cet appareil consistait en un creuset, muni d'une électrode verticale supérieure. Le courant électrique arrivait par la base, la matière soumise au traitement servait de conducteur intermédiaire, l'arc jaillissait entre cette matière et l'électrode. Après avoir employé le charbon pour l'électrode, Siemens fit usage d'un pôle supérieur en cuivre avec refroidissement par un courant d'eau intérieur.

Le four Cowles et le four Héroult méritent aussi d'être mentionnés comme des précurseurs.

Actuellement, les fours industriels se rattachent à trois catégories : fours à arc; fours à résistance; fours à résistance superficielle ou à incandescence.

Les fours à arc sont du système Moissan ou du système Siemens. Ils comportent soit un seul arc et deux électrodes mobiles, soit un seul arc et une seule électrode mobile, soit des arcs multiples. La tension y varie généralement de 50 à 60 volts. À côté de ses avantages, l'arc présente quelques inconvénients : élévation excessive de la température en certains points, d'où volatilisation des matières et danger de dissociation du corps obtenu; soufflage; décalage des courants alternatifs.

Dérivés du système Héroult, les fours à résistance sont constitués comme les précédents, mais disposés pour un fonctionnement à basse tension, 20 ou 25 volts. L'électrode verticale plonge dans la matière. On peut assez facilement répartir l'action calorifique.

Quant aux fours à résistance superficielle et incandescence, ils se rattachent au système Cowles. Les électrodes, à elles seules, ne permettent pas le passage du courant; on doit les relier par des morceaux de charbon juxtaposés, formant une sorte de lit de fusion sur lequel sont placées les matières à traiter. Ces fours sont ceux qui se prêtent aux plus forts voltages, 80 à 100 volts, et aux plus grandes puissances.

Les fours se classent aussi, d'après la nature et le mode d'action du

courant, en électrolytiques et électro-thermiques. À l'inverse des fours électrolytiques, les fours électro-thermiques sont, pour la plupart, alimentés par des courants alternatifs.

Dans l'ensemble, l'intensité des courants varie de 5,000 à 10,000 ampères et la puissance de 250 à 1,000 kilowatts.

Les fabrications auxquelles s'applique le four électrique sont déjà très nombreuses : carbure de calcium, aluminium, cuivre, carborundum, phosphore, vanadium, graphite, silicium, corindon, ferro-chrome, ferro-bore, ferro-titane, ferro-silicium, nickelo-bore, manganosilicium. Des essais pleins de promesses ont été tentés à Rome pour la métallurgie du fer. En 1900, les forces hydrauliques naturelles affectées à l'alimentation de fours électriques étaient évaluées à 230,000 chevaux (carbure de calcium, 185,000; aluminium, 17,000; cuivre, 11,000; carborundum, 2,000; etc.); notre contingent pour le carbure de calcium s'élevait à 60,000 chevaux.

C'est le carbure de calcium qui tient aujourd'hui la première place dans les industries électro-chimiques. Il sert principalement à la fabrication du gaz acétylène pour l'éclairage : un simple contact avec l'eau froide suffit à déterminer la réaction. En dehors de cet usage essentiel, le carbure de calcium trouve un emploi intéressant dans la préparation de métaux ou d'alliages par la réduction des oxydes et des chlorures. La découverte sur laquelle s'est édifiée la puissante industrie du carbure appartient à M. Moissan (1892); M. Bullier, en France, et M. Wilson, aux États-Unis, ont été les promoteurs militants de cette industrie, dont le procédé consiste à fondre au four électrique un mélange en proportions définies de charbon et de chaux : le produit se forme à l'état liquide et donne par refroidissement une masse cristalline. Des progrès rapides dans la construction des fours ont élevé leur rendement de 3 à plus de 7 kilogrammes par kilowatt et par vingt-quatre heures pendant la période 1897-1900.

Wöhler avait isolé l'aluminium, d'abord sous forme d'une poudre grisâtre, puis en petits globules (1827-1840). H. Sainte-Claire Deville créa en 1854 la préparation industrielle de ce métal. Toutefois cette préparation coûteuse ne put se développer amplement qu'avec

les fours électriques. La méthode actuelle, sortie des travaux de MM. Minet, Héroult et Hall, est celle de l'électrolyse d'un bain de cryolithe fondue (fluorure double d'aluminium et de sodium), contenant de l'alumine en dissolution, bain qu'on alimente d'une manière continue en alumine anhydre : la cryolithe se régénère constamment. Après avoir valu 300 francs en 1857, le kilogramme d'aluminium ne coûte plus aujourd'hui que 2 fr. 60 environ. Par son activité chimique et son affinité pour l'oxygène, l'aluminium constitue un réducteur puissant des oxydes et, dès lors, un agent fort utile de production des métaux ou de leurs alliages ; la chaleur que développent les réactions a été employée au travail des métaux et spécialement à la soudure du fer : les opérations de ce genre se rangent sous la dénomination d'aluminothermie.

Le siliciure de carbone cristallisé ou carborundum est un corps extrêmement dur, pouvant remplir les mêmes fonctions que l'émeri. M. Acheson l'a obtenu en chauffant au four électrique un mélange de silice, de coke, d'alumine et de chlorure de sodium. À l'état amorphe, le carborundum jouit de remarquables propriétés réfractaires et convient pour le garnissage des soles de fours métallurgiques.

5. Applications diverses. — L'ozone est un excellent stérilisateur de l'eau. Il y détruit les microbes pathogènes, ne la souille d'aucun élément étranger préjudiciable à la santé du consommateur, la rend moins sujette aux pollutions ultérieures. Les premiers essais de stérilisation par l'ozone ont été effectués en 1891 par le Dr Frölich, avec le concours de MM. Siemens et Halske, de Berlin. Une application aux eaux de Lille, due à MM. Marmier et Abraham (1898), paraît avoir complètement réussi. L'effluve électrique déterminant la formation de l'ozone se produit entre des plaques en fonte recouvertes de glaces et sous l'influence d'une différence de potentiel de 35,000 à 40,000 volts ; une circulation d'eau dans les électrodes assure le refroidissement de l'appareil ; l'ozonisation se fait par circulation inverse du gaz et de l'eau à stériliser à l'intérieur d'une colonne verticale. Il existe d'autres appareils ozoniseurs et aussi d'autres emplois de l'ozone, tels que la fabrication des parfums et l'épuration des jus sucrés.

À l'Exposition de 1900 figurait une nouveauté intéressante, la gravure de matrices dans des blocs d'acier avec le concours de l'électricité. La méthode consiste à mettre en contact le bloc métallique et un moule de plâtre imbibé d'une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque, puis à faire passer un courant dans le système, l'acier étant au pôle positif.

6. Industries connexes. — La seule industrie à mentionner est celle des conducteurs en charbon. Dès 1846, Staite et Edwards prenaient des brevets pour la fabrication des charbons agglomérés destinés aux usages électriques. La matière première était alors le coke des cornues à gaz, aggloméré avec du goudron; plus tard, on ajouta du noir de fumée, qui même, dans certains cas, se substitua entièrement au coke de cornue ou à son équivalent, le coke de pétrole. Devant indiquer, à propos de l'éclairage électrique, les procédés ordinaires de préparation et de cuisson, je me contente de signaler ici une intéressante application des fours électriques, due à MM. Girard et Street : ces ingénieurs transforment superficiellement le carbone amorphe en graphite sous l'action d'une température très élevée; ils ont créé, à cet effet, des fours continus. La graphitisation est souvent utile pour les balais collecteurs de courant dans les machines et pour les anodes dans certaines opérations électrolytiques.

§ 3. ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

1. **Historique sommaire.** — L'arc voltaïque avait été produit en 1813 par Davy, entre deux pointes de charbon de bois. Mais la possibilité de son emploi pour l'éclairage public ne fut pressentie qu'en 1842, après les expériences de Deleuil et Archereau. À cette époque, la production de l'électricité au moyen de piles exigeait des frais considérables; les moyens de régulariser la lumière étaient des plus primitifs. Avant d'entrer dans la voie des applications pratiques, il fallut que L. Foucault imaginât de substituer le charbon de cornue au charbon de bois, que Staite inventât un premier type de régulateur pour rapprocher automatiquement les charbons au fur et à mesure de leur combustion (1846), que les courants fussent fournis par des machines magnéto-électriques. Comme je l'ai déjà rappelé, la machine Nollet, dite *de l'Alliance*, ouvrit l'ère des machines industrielles à lumière (1850).

On avait longtemps échoué dans les tentatives pour alimenter industriellement plusieurs lampes à arc au moyen de la même machine; les foyers employés soit au service des phares, soit aux projections, soit à l'éclairage de certains ateliers, étaient associés chacun à une machine spéciale. Tous les régulateurs, celui de Foucault, celui de Serin et les autres avaient uniquement pour but de maintenir constante l'intensité du courant; il n'en entraînait qu'un par circuit. Des expériences faites à Lyon par Lacassagne et Thiers, en 1856, aboutirent pour la première fois à la division de la lumière électrique; mais leur mode de réglage ne frappa aucun industriel. La bougie Jablochkoff, inventée en 1876 pour marcher à l'aide de courants alternatifs, doit être considérée comme ayant la priorité parmi les appareils mis pratiquement en usage dans le but d'employer à plusieurs foyers le courant produit par une machine unique. Cette invention coïncidait à peu près avec la substitution par Carré d'un charbon artificiel, préparé à la filière, au charbon de cornue, coûteux, dur et difficile à travailler, substitution qui aida puissamment à l'essor de l'éclairage électrique. Avec son petit arc voltaïque, s'entretenant à longueur constante sans

mécanisme d'aucune espèce, la bougie Jablochkoff eut un succès rapide; elle marquait un pas important vers la division de la lumière, objectif des chercheurs de l'époque. Outre cette bougie, on vit à l'état d'essai, lors de l'Exposition de 1878, la lampe à arc Lontin, dont l'électro-aimant régulateur était placé en dérivation, ce qui permettait de disposer plusieurs foyers sur le même circuit.

Mais l'arc voltaïque, surtout alors qu'il n'existait pas encore de régulateur fonctionnant avec des courants très faibles, donnait à chaque foyer une intensité, un éclat qui le rendait inadmissible dans un éclairage privé. Le problème de l'éclairage domestique fut enfin résolu par la lampe à incandescence. Cette lampe, proposée déjà depuis plusieurs années, ne trouva sa forme pratique qu'en 1880, quand Edison en fit la base d'un système général, où des stations centrales distribuaient le courant électrique comme on distribue de l'eau et du gaz, dans des conditions appropriées aux besoins les plus divers. La conception d'Edison amena l'inventeur à créer, en même temps que sa lampe, l'outillage nécessaire pour la fourniture et la vente de la lumière à des quartiers tout entiers; il établit notamment de très ingénieux compteurs d'électricité. Peu après, en 1881, lors de l'Exposition spéciale d'électricité, les lampes Edison, Swan, Maxim, Lanc-
Fox, excitèrent un véritable enthousiasme.

Dans un autre ordre d'idées, on ne fut pas moins surpris, en 1881, de voir une seule machine Brush alimenter en un circuit unique jusqu'à 40 lampes à arc; cette machine produisant une force électromotrice de 2,000 volts, les arcs pouvaient en être éloignés de plusieurs kilomètres.

Si, de 1881 à 1889, la science n'eut à enregistrer aucune découverte capitale, la situation subit cependant une modification profonde. Dans tout le monde civilisé, des améliorations notables furent apportées aux machines génératrices, aux appareils de distribution, aux lampes à arc ou à incandescence. Les applications de l'éclairage électrique se multiplièrent, en même temps qu'elles s'adaptaient aux nécessités et aux convenances les plus diverses. Eu égard à son ampleur, l'Exposition universelle de 1889 offrait un magnifique champ de démonstration pour mettre en évidence le chemin parcouru : à la suite

d'accords avec l'Administration, un syndicat international d'électriciens se chargea d'éclairer les jardins et quelques édifices; le nombre des arcs ou bougies atteignit 1,053 et celui des lampes à incandescence 8,935; au service public ainsi organisé était adjoint un service d'éclairage privé.

L'année 1889 a marqué la fin de l'âge héroïque. Jusqu'alors, le but principal avait été de créer et de vulgariser, sans un très grand souci des dépenses ni des imperfections de détail. De 1889 à 1900, les efforts ont tendu non seulement à répandre l'éclairage électrique, mais à le perfectionner, à le rendre plus économique, à pourvoir les abonnés de compteurs simples et précis. Ce n'est point que certaines nouveautés ne soient apparues, comme l'arc Bremer et la lampe à incandescence Nernst. Néanmoins les tendances qui viennent d'être signalées constituent bien la caractéristique de la dernière période décennale du siècle. L'Exposition universelle de 1900, avec sa gigantesque distribution de lumière, a permis de mesurer la nouvelle étape franchie par l'éclairage électrique : à lui seul, le service public comportait 3,348 lampes à arc et 39,859 lampes à incandescence.

2. Lampes à arc. — M. Janet, directeur du laboratoire et de l'école supérieure d'électricité, rapporteur du jury de 1900 pour l'éclairage électrique, a présenté un rapport extrêmement remarquable, qui fixe l'état de la science et de la pratique à la fin du XIX^e siècle. La partie de ce rapport consacrée aux lampes à arc débute par quelques considérations générales et théoriques, dont un très bref résumé ne sera pas sans intérêt.

Dans les types classiques de lampes, la valeur photométrique dépend exclusivement de la nature, du diamètre et du régime électrique des charbons; le mécanisme est sans action sur elle.

Plusieurs auteurs ont cherché expérimentalement la relation qui unit, pour une paire de charbons donnée, la tension du courant, son intensité et la longueur de l'arc. Cette relation ne saurait se déduire de la loi d'Ohm, car l'arc se comporte comme une résistance variant avec l'intensité du courant et en sens inverse. D'après M^{me} Ayrton, dont les études sont les plus complètes, la différence de potentiel aux

charbons peut, en général, être approximativement considérée comme la somme de deux termes : une constante, représentant la chute au contact des charbons et de l'arc; un terme variable, proportionnel au rapport entre la longueur de l'arc et l'intensité du courant, et correspondant à la chute dans l'arc. Quand le courant est continu, la chute dans les charbons se partage très inégalement et a surtout pour siège le charbon positif. On la réduit beaucoup par l'emploi de charbons à âme saline; c'est un des principaux progrès de la fin du siècle.

Suivant M. Blondel, lorsque, pour une intensité constante, la tension aux bornes s'élève, le flux lumineux croît d'abord, atteint un maximum vers 50 ou 55 volts, puis décroît; le rendement a une allure analogue et passe par un maximum vers 45 volts. Toutes choses égales d'ailleurs, la diminution du diamètre des charbons entraîne une augmentation rapide du rendement: en effet, le cratère est moins masqué par le charbon négatif et l'incandescence du charbon positif prend plus d'étendue. Le flux lumineux et le rendement croissent très vite, au fur et à mesure que le courant devient plus intense. Trois faits essentiels se dégagent en ce qui concerne l'influence de la nature des charbons: les crayons tendres (riches en noir de fumée) donnent plus de lumière que les charbons durs, mais se consomment plus promptement; les crayons homogènes fournissent un rendement meilleur que les charbons à mèche; à écart égal, les mèches qui abaissent le plus la tension sont aussi celles qui développent le moins de lumière.

Des expériences de M. Janet ont confirmé les résultats obtenus par M. Blondel, en abaissant un peu les tensions auxquelles correspondent le maximum du flux lumineux et celui du rendement pour une intensité constante: le premier de ces maxima serait à 50 volts et le second à 41 volts. La tension procurant le flux spécifique maximum, à égalité de puissance dépensée, varierait entre 28 et 36 volts. Pour une même intensité et une même différence de potentiel, un accroissement de 30 à 33 p. 100 du diamètre des charbons réduirait de 10 à 20 p. 100 le flux spécifique, ce qui démontrerait l'opportunité d'admettre le minimum de diamètre compatible avec la limite acceptable de l'usure; à égale densité de courant, le rendement lumineux augmenterait avec le diamètre, c'est-à-dire avec la puissance dépensée.

Étudiant aussi l'usure des charbons, M. Janet est arrivé à des constatations fort intéressantes. Pour une intensité constante de 8 ampères et une tension variable, l'usure du charbon positif reste la même de 30 à 45 volts et croît ensuite de plus en plus vite; celle du charbon négatif, très faible aux basses tensions, augmente rapidement et régulièrement jusque vers 45 volts, après quoi l'accroissement se ralentit. Pour une tension fixe de 40 volts, l'usure du charbon positif progresse régulièrement et presque proportionnellement, quand le courant devient plus intense; celle du charbon négatif suit une marche parallèle jusqu'à 8 ampères et, au delà, croît d'une manière moins rapide. La consommation des deux charbons est la même pour les intensités de 4 à 9 ampères à la tension de 40 volts environ; lorsque l'intensité franchit 9 ampères, la tension correspondant à l'égalité d'usure des charbons croît en même temps (44 volts pour 12 ampères).

Les matières premières employées à la fabrication des charbons de première qualité sont le noir de fumée et le goudron. Pour la deuxième et la troisième qualité, on remplace une partie du noir de fumée par du charbon de cornue ou du coke de pétrole. Il importe que la préparation soit très soignée dans toutes ses phases : broyage, enlèvement des parcelles de fer au moyen de séparateurs magnétiques, pulvérisation, incorporation du goudron, tréfilage à chaud sous des presses hydrauliques développant une pression de 200 à 1,100 atmosphères, cuisson progressive dans des fours continus à récupération. Les charbons creux reçoivent une mèche en silicate de potasse et noir de fumée. Selon la qualité des charbons, le flux spécifique éprouve des variations de 25 à 30 p. 100.

Au point de vue cinématique, les lampes à arc se répartissent en quatre catégories : lampes à moteur, excellentes, mais aujourd'hui abandonnées, du moins pour le courant continu, par suite de la cherté du moteur; lampes à mouvement d'horlogerie et à déclenchement, très répandues et offrant une grande sûreté de fonctionnement; lampes à frein, présentant une extrême sensibilité de réglage, convenant bien aux éclairages fixes et réguliers, et cependant appliquées dans leur principe aux arcs en vase clos, qui peuvent se contenter d'un réglage relativement grossier; lampes équilibrées, sans mécanisme.

Au point de vue électrique, on distingue les lampes en série, les lampes en dérivation et les lampes différentielles. Le montage en série des électro-aimants de réglage exige une intensité déterminée; satisfaisant pour les lampes monophotes, il a été délaissé le jour où se sont généralisées les distributions en dérivation avec deux lampes sur 110 volts; les lampes en vase clos lui ont apporté un regain de faveur. À sa simplicité, le montage en dérivation joint le mérite de permettre une construction uniforme des lampes de toute intensité, dont le réglage agit seulement sur la tension aux bornes; son inconvénient est la variation du régime de la lampe en marche prolongée, due à l'échauffement de la bobine et à l'usure des charbons.

L'ancien système d'unité de lampe par machine ne subsiste plus que pour des phares et des projecteurs; actuellement, le même moteur doit alimenter des foyers multiplés. Dans le cas du courant continu, on recourt au montage en série ou au montage en dérivation : le premier continue à être très usité aux États-Unis; le second se fait, soit et le plus souvent par deux lampes en série avec un rhéostat sous 110 volts, soit par trois lampes en série sans rhéostat sous le même potentiel (ce qui nécessite des arcs à voltage réduit), soit par unité en vase clos à 80 volts avec rhéostat sous 110 volts. Ces deux derniers modes sont de création récente. Le courant alternatif se prête également à la distribution en série et à la distribution en dérivation : quand le montage a lieu en série, les appareils Ferranti ou autres analogues permettent de transformer le potentiel constant en intensité constante; avec le montage en dérivation, on peut substituer aux rhéostats des bobines de réaction, dont les propriétés comme celles des transformateurs autorisent de nombreuses combinaisons pour l'allumage, sur une distribution à 110 volts, d'une, de deux ou de trois lampes en série sans augmentation appréciable de la perte d'énergie.

Ainsi que je viens de l'indiquer, les deux principales nouveautés de 1900 pour le montage des lampes à arc sur les circuits étaient la distribution par trois lampes en série sans rhéostat sur courant continu à 110 volts et l'emploi des lampes en vase clos. De ces innovations, la première fournit, dans l'état actuel de la fabrication des charbons, une économie allant jusqu'à 10 p. 100; elle nécessite le

réglage différentiel des lampes; pour combattre la tendance du courant à prendre sous les plus petites influences une intensité dangereuse, il faut recourir à des expédients tels que l'addition d'un rhéostat automatique normalement en court-circuit ou d'un mécanisme de recul allongeant l'arc à la moindre augmentation de l'intensité. La lampe en vase clos, dont l'idée remonte à Staite (1846), peut fournir, sans remplacement des charbons, une durée d'allumage dix ou douze fois supérieure à celle des lampes ordinaires; elle donne une lumière violacée; une tension élevée et de très légères rentrées d'air assurent la combustion entière des vapeurs de charbon et empêchent l'obscurcissement du globe par le dépôt d'un nuage charbonneux.

M. Janet, dans son rapport spécial, et M. Michel Lévy, dans son rapport général, insistent sur une autre nouveauté de 1900, la lampe Bremer. Cette lampe à charbons inclinés, dont la disposition rappelle celle de l'ancienne lampe Soleil, est pourvue d'un réglage électro-magnétique tendant à allonger l'arc et à lui donner une longueur constante; les charbons de composition spéciale contiennent des sels qui colorent l'arc et l'entourent d'une flamme riche en rayons jaunes et rouges. L'appareil n'avait pas encore reçu en 1900 sa forme définitive; il paraissait cependant offrir de notables avantages, donner un rendement de beaucoup supérieur à celui des lampes ordinaires.

3. Lampes à incandescence. — L'éclairage électrique par incandescence a pris un énorme développement de 1889 à 1900. Pendant l'année 1889, la puissance des secteurs parisiens, traduite en lampes de 10 bougies et d'ailleurs consacrée, pour la plus large part, à la production de la lumière, ne dépassait pas 45,400 lampes; en 1900, le chiffre correspondant atteignait 1,333,200. Certaines sociétés fabriquent de 25,000 à 30,000 lampes par jour. Le prix unitaire était de 5 francs en 1889 et de 0 fr. 50 en 1900.

Aujourd'hui, les filaments sont presque partout formés de cellulose dissoute dans des liquides tels que l'éther ou le chlorure de méthyle, amenée ainsi à l'état de pâte, tréfilée et calcinée à l'abri de l'air dans des fours spéciaux. Les fils métalliques leur servant de support se composent de trois tronçons : un fil de nickel; un fil de platine, seul métal

capable de se souder au verre; un fil de cuivre. À son extrémité inférieure, le fil de nickel présente une gouttière cylindrique où le filament est engagé et soudé par un dépôt de carbure très résistant, qu'on obtient au moyen de la décomposition d'un hydrocarbure liquide. Le fil de platine se soude au sommet d'un tube de verre, dont la base a été évasée en forme de collerette. Enfin le fil de cuivre traverse la douille; il est soudé à la pièce de contact d'un culot à vis ou à baïonnette. Avant son introduction dans l'ampoule, le filament doit être porté au rouge, à l'aide du courant, dans une atmosphère de gaz carboné, qui le recouvre d'une couche de carbone dur augmentant sa durée. Une fois le filament introduit dans l'ampoule, on soude au chalumeau la collerette de support et on fait le vide par une pompe à mercure, en faisant passer le courant dans le filament pour le chauffer et chasser les derniers gaz, après quoi l'ampoule est fermée au chalumeau. Les dernières opérations consistent à munir la lampe de son culot, à souder les fils de cuivre aux pièces de contact et à effectuer l'étalonnage. Ce mode de procéder, le plus usuel, comporte des variantes sur lesquelles je n'ai pas à insister ici.

En 1900 sont apparues des lampes à 220 volts, présentant deux filaments de 110 en série ou faites d'un filament unique. Les services de l'Exposition ont employé un grand nombre de ces lampes. Pour prévenir la formation d'un arc entre les racines du filament, il faut isoler soigneusement ces racines l'une de l'autre.

Inversement, on établit des lampes à très faible tension, 20 ou 25 volts, par exemple, pour l'éclairage des wagons où la force électromotrice disponible est généralement restreinte.

Des expériences, dont M. Janet indique les résultats détaillés, prouvent qu'une lampe ordinaire de 110 volts consomme en moyenne 3 watts 85 par bougie et peut fonctionner plus de 500 heures avant de subir un déchet de 25 p. 100 dans son flux lumineux.

L'Exposition de 1900 a signalé à l'attention publique les lampes Nernst, dont l'incandescence se produit, non dans le vide, mais dans l'air. Ces lampes, quoique nouvelles, ne constituent que le perfectionnement d'une ancienne invention de Jablochkoff. Leur filament, à base de magnésie, est mauvais conducteur à froid et doit être chauffé

pour que le courant puisse y passer et le rendre incandescent. Elles sont, les unes à allumage non automatique, les autres, au contraire, à allumage automatique. Toutes ont, en série dans le circuit du filament, une résistance de réglage faite d'un fil de fer qui est enroulé autour d'un petit tube de porcelaine et enfermé dans une ampoule hermétique. Les lampes à allumage non automatique reçoivent un filament en demi-circonférence légèrement surhaussée; elles ont accusé, aux essais de 1900, une dépense spécifique très inférieure à celle des lampes usuelles; en revanche, leur durée est assez faible et l'allumage expose à des risques de rupture du filament; seul, le courant continu semble leur convenir. Dans les lampes à allumage automatique, le filament, de forme rectiligne, se trouve enveloppé d'une hélice en matière isolante autour de laquelle court en spirale un fil métallique; pour allumer, on lance le courant dans le fil et on porte au rouge l'hélice isolante, dont le rayonnement élève la température du filament, le rend apte à recevoir le courant et le fait passer à l'incandescence, en même temps que fonctionne un interrupteur automatique du circuit d'allumage; si ce dispositif agit bien lorsque la lampe est placée de manière à éclairer le sol, son fonctionnement exige, pour la position inverse, un trop long délai; les lampes à allumage automatique l'emportent sur les lampes ordinaires Nernst au point de vue des risques de rupture accidentelle du filament, mais présentent des désavantages, tels qu'infériorité de la lumière émise, défaut d'uniformité de la répartition lumineuse horizontale, forme rectiligne du filament peu favorable à sa conservation, etc.

4. Appareillage. — Maintenant, l'appareillage est traité avec tout le soin qu'il mérite, eu égard à son influence sur le bon fonctionnement des installations. L'élévation progressive des tensions a entraîné une étude plus attentive des appareils, notamment pour prévenir l'amorçement d'un arc lors de la rupture d'un interrupteur ou d'un coupe-circuit.

Parmi les objets de gros appareillage exposés en 1900 figuraient des réducteurs automatiques destinés aux batteries d'accumulateurs et des jeux d'orgues pour théâtres. On sait la complication que présente

l'éclairage des théâtres, les précautions à prendre dans l'intérêt de la sécurité publique, l'infinie variété des effets à obtenir; les appareils de manœuvre, en particulier ceux des rhéostats, sont groupés en un système dénommé jeu d'orgue et comportant des transmissions mécaniques ou électriques.

Un spécimen très curieux et très original d'appareillage était celui du Château d'eau à l'Exposition de 1900. D'ingénieuses combinaisons de claviers et de cylindres analogues à ceux des boîtes à musique permettaient la réalisation simple et instantanée des effets lumineux les plus divers.

§ 4. TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE.

1. **Appareils télégraphiques.** — Au début du xix^e siècle, les communications rapides à grande distance étaient assurées par le télégraphe aérien des frères Chappe. Ce télégraphe, que la Convention adopta en 1793, devint populaire au lendemain même de sa naissance, grâce à l'annonce d'un succès militaire, la reprise du Quesnoy sur les Autrichiens (15 août 1794). L'emploi de lunettes puissantes pour l'observation des signaux permettait de placer les postes à une distance moyenne de 10 kilomètres environ les uns des autres. Bien que le trajet de Paris à Lille fût coupé par plus de vingt postes intermédiaires, le délai des transmissions pouvait être restreint à deux minutes. Interrompu la nuit, le fonctionnement du télégraphe se trouvait en outre fréquemment entravé par les phénomènes atmosphériques. Malgré ses imperfections, la télégraphie aérienne resta sans rivale en France jusqu'à l'année 1839 et ne céda complètement la place à la télégraphie électrique que vers le milieu du siècle. Elle subsista d'ailleurs pour l'échange des dépêches entre les navires et le littoral.

Dès 1753, l'écosais Marshall avait non seulement conçu le principe, mais donné les détails d'un système de communications télégraphiques au moyen du fluide électrique accumulé dans une bouteille de Leyde. Lesage, Lomond, Betancourt, etc., se livrèrent à des recherches analogues pour l'utilisation de l'électricité statique. Après la découverte de la pile, Sœmmering imagina de mettre à profit son action décomposante sur l'eau, de provoquer au poste récepteur des dégagements gazeux indiquant les lettres de l'alphabet. Les belles expériences d'Ørsted, origine de l'électro-magnétisme, préparèrent la solution du problème qui commençait à fixer l'attention des savants. Dans une note publiée, le 2 octobre 1820, aux *Annales de physique et de chimie*, Ampère proposa une combinaison ayant pour base la déviation d'aiguilles aimantées par un courant. Près de vingt années s'écoulèrent encore avant que des conceptions réellement pratiques se fissent jour : il était réservé à Wheatstone (Angleterre) et à Steinheil (Bavière) d'ouvrir, en 1837, l'ère des applications.

Jusqu'alors; la plupart des systèmes inventés pour la télégraphie électrique exigeaient autant de fils conducteurs que de signaux à transmettre, par exemple, vingt-cinq fils correspondant aux vingt-cinq lettres de notre alphabet, plus un fil de retour destiné à la fermeture des circuits. Wheatstone trouva une ingénieuse combinaison qui réduisait à six le nombre des fils; cinq aiguilles aimantées lui suffisaient; son appareil comportait d'ailleurs une sonnerie fonctionnant sous l'influence d'un électro-aimant. Les essais entrepris de Londres à Birmingham réussirent complètement; seule, la sonnerie laissait à désirer, et cette imperfection amena Wheatstone à créer les relais, innovation féconde, car elle devait accroître considérablement la distance de perception des signaux et supprimer en quelque sorte les grandes lignes.

De son côté, Steinheil expérimentait un télégraphe ne nécessitant qu'un seul circuit, susceptible d'être mis en jeu par une machine magnéto-électrique et laissant sur une bande de papier les traces de la dépêche envoyée. Son principal titre de gloire fut l'introduction de la terre dans le circuit : ce trait de génie, en dispensant du fil de retour, allait contribuer puissamment à l'essor de la télégraphie.

L'année suivante (1838), l'américain Morse faisait breveter en Europe un appareil appelé au plus brillant avenir. Cet appareil, analogue dans son principe à celui de Steinheil, en différait surtout par la substitution d'un électro-aimant au galvanomètre du récepteur. Tels qu'ils étaient alors construits, les électro-aimants ne donnaient de bons résultats qu'à la condition de ne pas être très éloignés du poste expéditeur. Les relais de Wheatstone vinrent heureusement fournir à Morse le moyen de vaincre la difficulté.

Diverses modifications successives furent apportées au télégraphe à cinq aiguilles de Wheatstone. La Compagnie télégraphique de Londres, avec le concours de Cooke, ramena le nombre des galvanomètres de cinq à deux. Glæsener changea certaines dispositions du récepteur et du manipulateur. Bain, tout en restant fidèle aux aiguilles aimantées, établit d'après des principes nouveaux un télégraphe destiné au service de la ligne d'Édimbourg à Glasgow (1846). Henley, Allan, etc., produisirent d'autres variantes. Je n'insisterai pas davantage sur ces

appareils primitifs; il ne faudrait point cependant les considérer comme de simples reliques du passé : le General Post Office en fait encore usage sur des lignes secondaires.

Peu après le télégraphe à aiguilles, Wheatstone créait le télégraphe à cadran (1840). Le manipulateur était formé d'un disque en cuivre, dont la circonférence présentait douze entailles garnies d'ivoire et portait gravées, tant au droit de ces entailles que dans leurs intervalles, les vingt-cinq lettres de l'alphabet; un ressort, en rapport avec le pôle positif d'une pile, appuyait sur cette circonférence et fermait ou interrompait alternativement le circuit quand on imprimait au disque un mouvement de rotation autour de son axe. Au poste de réception, une armature aimantée oscillant entre les deux pôles d'un électro-aimant sous l'action des passages ou des interruptions du courant faisait tourner une roue à rochet, avec ressorts d'encliquetage, et un disque à alphabet périphérique qui montrait, en face d'un repère, la lettre transmise par le poste expéditeur. Plus tard, Wheatstone munit le récepteur d'un mécanisme d'horlogerie, dont l'ancre d'échappement était commandée par deux électro-aimants; en même temps, il adaptait au manipulateur du poste d'expédition un commutateur à deux ressorts. De ces dispositifs sont nés, par des perfectionnements inutiles à rappeler dans leurs détails, les télégraphes à cadran de Bréguet, Froment, Digney, etc. Parmi les modèles successivement imaginés, une mention spéciale est due au télégraphe imprimeur de Dujardin, qui permettait d'avoir, au départ et à l'arrivée, une reproduction typographique des dépêches. Les télégraphes à cadran ne peuvent fournir un débit considérable; mais leur maniement est particulièrement facile; aussi ont-ils rendu et continuent-ils à rendre d'excellents services entre les mains d'agents d'une instruction professionnelle limitée.

Au début, l'Administration française, désireuse de ne pas troubler outre mesure les habitudes du personnel, crut devoir transporter dans la télégraphie électrique les signaux Chappe. Elle appliqua le télégraphe Foy-Bréguet, dans lequel deux manivelles susceptibles de prendre huit positions angulaires communiquaient des mouvements semblables à deux aiguilles réceptrices, par des combinaisons dérivées

de celles du télégraphe à cadran (1845). Deux fils étaient indispensables.

Les télégraphes à aiguilles aimantées, les télégraphes à cadran et le télégraphe Foy-Bréguet ne donnaient en général que des signaux fugitifs. Au contraire, le télégraphe Morse était à signaux persistants, faits de points et de traits, dont les combinaisons variées représentaient les lettres de l'alphabet. Un manipulateur très simple à levier articulé lançait ou interrompait le courant dans le fil conducteur; l'appareil de réception comprenait un électro-aimant soumis à l'action de ce courant, une bascule porte-style attirée par l'électro-aimant pendant les périodes plus ou moins longues de fermeture du circuit, une bande de papier mise en mouvement au moyen d'un mécanisme d'horlogerie et recevant l'empreinte du style sous forme de points et de traits. Admis d'abord en Amérique, puis en Europe vers 1850, le télégraphe Morse a été l'objet de nombreuses modifications portant, soit sur l'organe enregistreur (pointe sèche, plume, molette, courant local d'électrolyse), soit sur d'autres parties des appareils; son principe n'en est pas moins resté intact et les tentatives d'amélioration qui aboutissaient à le compliquer ont presque toutes échoué. Malgré son rendement peu élevé, 750 mots au maximum en une heure, il reste universellement employé. Tantôt le récepteur est directement relié à la ligne, tantôt un relais s'interpose à la jonction; cette dernière disposition, favorable à la netteté de la lecture, prévaut dans plusieurs pays. Un agent exercé lit facilement les dépêches au son, par la seule cadence des battements du récepteur; on conçoit donc que, le cas échéant, l'appareil puisse être réduit au rôle de parleur.

Il existe des télégraphes enregistreurs à transmission automatique, comme celui de Wheatstone qui figurait à l'Exposition universelle de 1900 et dont les origines remontent à 1858. Le récepteur du télégraphe automatique Wheatstone est un Morse à électro-aimant polarisé, dont l'armature conserve la position qu'un courant lui fait prendre, jusqu'à ce qu'un courant de sens contraire le déplace en sens opposé. Au poste de départ, les émissions de courant sont faites à l'aide d'un carton perforé, rappelant ceux des métiers à la Jacquard. Le but étant de desservir des lignes très longues et d'opérer des transmissions ra-

pides, Wheatstone a dû renoncer aux émissions simples ordinaires, qui tendent à se confondre, si elles sont de même signe, ou à s'éteindre mutuellement, si elles sont de signe contraire, et leur a substitué des émissions compensées, c'est-à-dire formées chacune d'une série d'émissions de sens contraire, d'intensités et de durées décroissantes, entre lesquelles s'intercalent au besoin des périodes de mise à la terre. Des relais sectionnent les lignes et restreignent, pour chaque tronçon, l'effet perturbateur de la capacité. Un perforateur à poinçons, manœuvré par des touches, sert à la préparation des bandes de papier. Les appareils actuels peuvent transmettre 7,000 mots à l'heure.

MM. Virág et Pollák présentaient en 1900 un autre télégraphe enregistreur automatique, utilisant aussi pour la transmission des bandes de papier perforé. Ici, le récepteur consiste en un miroir oscillant actionné par des membranes de téléphone et réfléchissant un rayon lumineux qui trace sur un papier photographique des crochets à droite et à gauche de la ligne médiane : la combinaison de ces crochets constitue l'alphabet. Deux fils sont nécessaires. Un essai sur 400 kilomètres a donné 60,000 mots à l'heure, soit 30,000 par fil.

Avant de quitter les appareils enregistreurs, je citerai encore le télégraphe Ader destiné aux lignes sous-marines. Un fil fin et flexible, disposé transversalement aux lignes de force d'un champ magnétique, est traversé par le courant et entraîné vers l'un ou l'autre des côtés du champ; ses mouvements, amplifiés par un procédé optique, s'inscrivent sur du papier sensible.

Passons maintenant aux télégraphes imprimeurs, dont l'invention est attribuée soit à Vail (1837), soit à Wheatstone (1840), mais qui ne sont vraiment entrés dans le domaine de la pratique qu'avec l'appareil Hughes. À la suite d'essais aux États-Unis, cet appareil fut présenté au Gouvernement français en 1860. Il tient actuellement une grande place dans l'outillage de la télégraphie européenne. Le manipulateur est une table horizontale à vingt-six trous correspondant aux lettres de l'alphabet et livrant passage à des goujons qu'on soulève au moyen des touches d'un clavier; le goujon levé rencontre un chariot supérieur tournant d'un mouvement uniforme et ce contact ferme le circuit. Quant au récepteur, il a pour organe principal une petite roue,

dite *roue des types*, sur laquelle sont gravées en relief les lettres de l'alphabet et qui tourne uniformément, de manière à accomplir une ou deux révolutions par seconde; lors des passages du courant, un électro-aimant applique contre la lettre inférieure une bande de papier qui en prend l'empreinte à l'encre grasse; en retombant, le papier avance de l'espace d'une lettre. On comprend que les mots transmis par le manipulateur s'impriment au récepteur, si le chariot et la roue des types sont en synchronisme parfait; ce synchronisme peut être réalisé expérimentalement au moyen de corrections convenables apportées à la vitesse et à la phase de la roue des types. La transmission, plus rapide qu'avec le Morse, puisqu'une seule émission de courant suffit pour chaque lettre, atteint 1,800 ou 2,000 mots par heure. Des modèles nombreux d'appareils imprimeurs ont été établis suivant le type Hughes ou d'après sa donnée générale. La famille des télégraphes imprimeurs comprend d'ailleurs, outre les appareils à mouvements synchroniques, des appareils à échappement (Digney, Dujardin, d'Arlincourt, Chambrier, etc.).

Gintl fit connaître en 1853 le principe de la transmission simultanée de deux dépêches dans des directions inverses par un même fil ou transmission duplex; les tentatives d'application, d'abord infructueuses, réussirent grâce aux travaux de Stearns (1868). Deux méthodes permettent de réaliser la transmission duplex : méthode différentielle; méthode du pont de Wheatstone. Pour le premier mode de procéder, le récepteur de chacun des postes comporte un électro-aimant différentiel, relié par l'un de ses fils à la ligne extérieure et par l'autre à une ligne locale, qui se compose d'un rhéostat et d'un condensateur offrant la résistance et la capacité de la ligne extérieure; le transmetteur commande les deux circuits; en analysant l'effet des émissions de courants, il est facile de reconnaître que le récepteur du poste de départ n'est jamais influencé par son transmetteur et que celui du poste d'arrivée l'est, au contraire, dans le cas de deux émissions simultanées se détruisant sur la ligne principale comme dans le cas d'une émission unique. La seconde méthode consiste à placer le récepteur de chaque poste sur le pont d'un parallélogramme de Wheatstone dont deux côtés sont égaux et dont les deux autres côtés sont

formés par la ligne extérieure ainsi que par une ligne locale de même résistance; elle donne des résultats identiques à ceux de la méthode différentielle. Des variantes ont été imaginées et mises en pratique avec succès.

Si rapide que soit le travail d'expédition fourni par un transmetteur, il est loin d'occuper d'une manière continue la ligne télégraphique; ses émissions sont séparées par des intervalles pendant lesquels cette ligne reste inactive. Afin de tirer un meilleur parti du fil, Rouvier eut l'idée de lui faire desservir plusieurs appareils, chacun d'eux disposant de la ligne à tour de rôle pendant le délai nécessaire pour émettre un signal; au poste d'arrivée, les récepteurs devaient subir le même partage; les périodes de fermeture de la ligne à un couple déterminé d'appareils étaient réservées à la préparation du signal suivant par le poste expéditeur et à l'enregistrement du signal précédent par le poste récepteur (1860). Meyer réalisa en 1872 la conception de Rouvier et inaugura ainsi les transmissions multiples alternées. Il distribuait les communications, au poste de départ et au poste d'arrivée, par des commutateurs synchroniques tournant autour du centre d'un disque qui se divisait en un nombre de secteurs égal à celui des appareils transmetteurs ou récepteurs; les secteurs étaient respectivement reliés à ces appareils; chaque secteur présentait lui-même une division en huit parties correspondant aux huit touches d'un clavier manipulateur, à l'aide duquel on produisait tous les signaux de l'alphabet Morse; les transmissions pouvaient avoir lieu dans un sens ou dans l'autre et le rendement sur la ligne Paris-Lyon (500 kilomètres) atteignait couramment 3,000 mots à l'heure. Ensuite est venu le système Baudot (1874), auquel recourent largement les services européens et qui, fondé sur un principe semblable à celui de Meyer, a en outre l'avantage de donner des lettres comme dans l'appareil Hughes; les secteurs entre lesquels se répartit le disque distributeur de départ sont subdivisés en cinq sous-secteurs correspondant aux cinq touches d'un clavier, qui fournit des signaux composés de cinq émissions positives ou négatives d'égale durée; au poste de réception, un combinatoire formé de rayons, tantôt métalliques, tantôt isolants, sur lesquels se meut un frotteur armé de ressorts, traduit les signaux

conventionnels en impression typographique; à l'aide d'une roue des types en synchronisme avec le frotteur; pour chaque couple d'appareils, cette traduction s'effectue pendant que les autres couples occupent la ligne; la vitesse de transmission est de 1,800 mots à l'heure par clavier. M. Munier exposait en 1889 et en 1900 un Hughes multiple procédant d'une idée assez voisine, mais usant de moyens différents : transmission par un clavier où le simple enfoncement d'une touche engendre un signal complexe; formation des signaux par deux émissions au plus, l'espacement de ces émissions étant mis à profit en même temps que leur polarité; distribution des signaux à l'arrivée entre des groupes de relais desservant chacun, en local, un Hughes synchrone pourvu d'un distributeur particulier. Un système très différent, exposé en 1900, celui de M. Rowland (États-Unis), utilise des courants alternatifs industriels; la transmission s'opère par un clavier alphabétique qui, pour chaque lettre, supprime deux demi-périodes non consécutives choisies parmi les six périodes successives d'affectation de la ligne à chaque clavier; au poste d'arrivée, muni d'une dynamo alternative du même nombre de pôles que la machine de transmission, se trouve un relais polarisé oscillant avec une périodicité égale à celle du courant; les suppressions de courant provoquent dans les relais des arrêts et des signaux interprétés ensuite et imprimés sur des feuilles de papier par des combineurs à caractères alphabétiques; quatre claviers donnent 7,200 à 9,600 mots par heure, et ce rendement peut être doublé, si on transmet des deux bouts à la fois. Mentionnons encore le système Delany (Grande-Bretagne), où le principe des distributeurs synchrones est appliqué, non plus pour la transmission à tour de rôle d'un signal élémentaire, mais pour celle de signaux décomposés en émissions partielles.

Un autre procédé d'accroissement du débit consiste à superposer des transmissions indépendantes dans le même sens et à employer, pour cet objet, des courants de noms contraires, d'intensités différentes, de nature variée, ne pouvant influencer que les appareils destinés à les recevoir. Il a été essayé, pour la première fois, par Starcke (Autriche), en 1855; les noms de Duncker, Wartmann, Sieur, méritent aussi d'être retenus comme ceux d'habiles initiateurs. Elisha Gray mon-

trait à l'Exposition de 1878 un curieux télégraphe harmonique, dont les transmetteurs et les récepteurs étaient des diapasons vibrants; les tiges expéditrices transformaient le courant de ligne en courants ondulatoires actionnant les diapasons récepteurs accordés avec elles; des relais commandant un Morse enregistraient les signaux reçus. Un exemple bien connu des transmissions indépendantes est le système van Rysselberghe pour la télégraphie et la téléphonie simultanées, dans lequel des bobines de self-induction précédant le récepteur ordinaire laissent passer les courants ordinaires et arrêtent les courants vibratoires, tandis que le téléphone s'attache au delà d'un condensateur d'effet inverse. Le phonopore, exposé en 1900 et applicable à deux transmissions télégraphiques, ne diffère pas, au fond, du Van Rysselberghe. MM. Mercadier et Pierquin, reprenant le télégraphe harmonique d'Elisha Gray, se servent de diapasons au départ pour lancer des courants ondulatoires; ces courants arrivent à un relais constitué par la superposition d'un téléphone et d'un microphone, sont amplifiés dans un circuit local et parviennent à des membranes rigides qui ne sont sensibles qu'aux émissions en harmonie avec leur période de vibration; vingt-quatre transmissions, de la vitesse du Morse, peuvent être superposées et donner un débit de 18,000 mots à l'heure.

Jusqu'ici, je n'ai pas parlé des appareils autographiques. Leur faible rendement les a fait délaissés; mais ils n'en sont pas moins fort ingénieux et intéressants. C'est à l'anglais Backwell qu'on doit le premier appareil de ce genre (1851) : un papier métallique, portant la dépêche tracée au crayon isolant ou à l'encre isolante, était enroulé autour d'un cylindre tournant, le long duquel un style en platine ou en or dessinait une spirale très serrée, arrêtant le courant quand il rencontrait un trait isolant; ces interruptions se traduisaient à l'arrivée sur un papier chimique animé d'un mouvement synchrone. L'abbé Caselli perfectionna l'invention de Backwell et créa un modèle que l'Administration française mit en service à partir de 1863. D'Arincourt réalisa de nouvelles améliorations, notamment au point de vue de la régulation des mouvements, et procéda avec succès à des expériences entre Paris et Marseille (1872). Lenoir avait exposé en

1867 un télégraphe autographique où le tracé du dessin, dans la station réceptrice, au lieu d'être électro-chimique, se faisait par une molette encrée et attirée vers le papier lors des passages du courant; le synchronisme était assuré électriquement. A la même époque, l'Administration substitua à l'appareil Caselli un appareil électro-magnétique de Meyer, présentant de l'analogie avec celui de Lenoir. Il y a lieu de rappeler encore l'appareil électro-mécanique de Jordery, présenté en 1889.

Le récepteur le plus usuel pour les grands câbles sous-marins fut pendant longtemps le galvanomètre Thomson à miroir mobile réfléchissant la flamme d'une bougie; sous l'influence des émissions positives ou négatives, l'image se déplaçait vers la droite ou vers la gauche, et ses mouvements formaient les signaux Morse, avec cette convention que tout déplacement à droite représentait un point, tout déplacement à gauche une ligne. Plus tard, sir William Thomson (Lord Kelvin) remplaça le galvanomètre à miroir par un appareil inscripteur, dit *siphon recorder* : le nouvel instrument comportait un cadre très mobile, placé dans le champ d'un fort électro-aimant, tendant à tourner dans un sens ou dans l'autre selon le sens du courant et entraînant un tube de verre en forme de siphon; ce siphon était rempli d'encre électrisée, qu'il crachait sur une bande de papier par suite de la répulsion électrique; des signaux conventionnels figuraient les lettres de l'alphabet. J'ai déjà signalé l'appareil Ader parmi ceux qui servent aussi pour les longues lignes sous-marines.

De nombreux appareils accessoires concourent aux transmissions télégraphiques. Au premier rang se placent les relais employés soit à renouveler une ou plusieurs fois sur un parcours étendu les émissions de courant que la résistance du conducteur affaiblirait trop, soit à fermer le circuit d'une pile locale dont l'action est nécessaire pour faire fonctionner un appareil peu sensible ou pour obtenir un résultat déterminé. Les constructeurs ont imaginé des types nombreux de relais; entre autres appareils récents, le relais Claude, disposé d'après le principe du galvanomètre d'Arsonval, se recommande par sa sensibilité et son apériodicité.

Lorsque plusieurs postes sont embrochés sur une même ligne, il est

utile que l'un d'eux puisse à volonté en appeler un autre et correspondre avec lui, sans que les stations non intéressées en éprouvent un dérangement et sans qu'elles puissent troubler ou suivre indûment la communication; souvent aussi, un poste doit pouvoir appeler tous les autres à la fois et leur transmettre un même avis. Des rappels plus ou moins compliqués suivant les cas satisfont à cette double condition.

Dans beaucoup de cas, des lignes de courte longueur convergent vers une grande ville. Naguère encore, le bureau central recevait toutes les transmissions, les triait, les répartissait et les réexpédiait, s'il y avait lieu. Par imitation des procédés de la téléphonie, on a créé des tableaux à fiches, permettant, au moyen d'une manœuvre fort simple, de prendre chaque ligne, de la renvoyer sur tel appareil du poste central qui se trouve libre, de la lier directement avec un autre correspondant extérieur, etc.

Eu égard au prix élevé des correspondances en clair par les câbles sous-marins, les administrations ont admis et réglementé des codes ou répertoires abrégatifs.

Une des conquêtes les plus merveilleuses de la fin du ^{xix}^e siècle a été la télégraphie sans fil, au sujet de laquelle un précédent chapitre contient déjà quelques indications sommaires.

Depuis longtemps, le Post Office, impuissant à empêcher les ruptures fréquentes de câbles entre la côte et certains phares ou bateaux-feux, s'était posé le problème de la transmission directe des signaux sans intermédiaire de conducteurs. M. Preece chercha la solution en s'inspirant de l'influence perturbatrice que les émissions saccadées de la télégraphie ou les courants alternatifs industriels exercent à grande distance sur les circuits téléphoniques. En chacun des points à relier entre eux, il établit des cadres multiplicateurs très allongés; l'excitation brusque d'un de ces cadres par un courant énergique déterminait dans l'autre un effet d'induction correspondant; des interrupteurs rapides ou une force électromotrice ondulatoire au départ et un relais approprié à l'arrivée permirent l'échange régulier de signaux. Cependant il n'y avait là qu'une solution tout à fait imparfaite et limitée.

La télégraphie sans fil a son origine première dans les travaux de Maxwell et de Hertz. Maxwell avait expliqué les ondes lumineuses par des phénomènes électriques alternatifs qui se propageaient de proche en proche et dont les alternances offraient une fréquence prodigieuse (un milliard en un millionième de seconde). Reprenant les idées de Maxwell, Hertz entreprit en 1888 de les soumettre au contrôle de l'expérience. Il employa, à cet effet, un excitateur produisant des courants à très rapide alternance et un résonnateur permettant de suivre la vibration électrique. L'excitateur se composait de deux conducteurs placés très près et en prolongement l'un de l'autre, terminés vers l'extérieur par des sphères et vers l'intérieur par de petites boules, et mis en communication avec les deux pôles du secondaire d'une bobine de Ruhmkorff. Quant au résonnateur, il était formé de deux sphères maintenues à distance fixe et réunies par un arc métallique; Hertz en choisissait d'ailleurs les éléments de manière à l'accorder avec l'excitateur et à le rendre particulièrement sensible aux influences inductrices des ondes issues de ce dernier. Entre les petites boules de l'excitateur éclataient des décharges brusques par étincelle, faites d'une série oscillatoire dont la période était, dans les expériences de Hertz, d'un cinquante-millionième de seconde; pendant que fonctionnait l'excitateur, des étincelles jaillissaient entre les sphères du résonnateur. Hertz démontra que les corps conducteurs arrêtaient les ondes électriques, qu'elles traversaient les corps isolants, qu'à la séparation de milieux différents elles obéissaient aux lois de la réflexion, de la réfraction et de la dispersion; il produisit le phénomène des interférences, s'en servit pour déterminer la vitesse de propagation des ondes électriques dans l'air et trouva une valeur presque identique à celle de la vitesse des ondes lumineuses. De nombreux physiciens du monde entier répétèrent les expériences de Hertz et prouvèrent l'identité des deux vitesses.

Un second fait d'importance capitale pour la télégraphie sans fil fut l'invention du cohéreur par M. le docteur Branly, de Paris. Ce savant avait reconnu que de la fine limaille métallique renfermée dans un tube devenait conductrice sous l'action d'une étincelle voisine et qu'ensuite une petite secousse lui rendait sa résistance première; utilisant

cette propriété, il construisit, en 1890, un radio-conducteur propre à recueillir les ondes électriques, véhicule des vibrations électriques d'un radiateur, et actionnant une sonnerie ou un télégraphe Morse; par l'éloignement progressif des appareils, il constata la possibilité de communications à plusieurs kilomètres. M. Lodge dota le cohéreur d'un dispositif assurant la production automatique des secousses qui devaient lui restituer sa résistance : l'instrument était intercalé dans un circuit avec une pile et un relais; dès qu'il devenait conducteur, un courant s'établissait et le relais faisait tomber un marteau.

M. Lodge avait émis l'idée que les coups de foudre devaient avoir le caractère de décharges oscillatoires et, dès lors, influencer les tubes à limaille. Désireux de vérifier le fait, M. Popoff installa, en 1895, dans son laboratoire un cohéreur, relia l'un des pôles de l'appareil à un paratonnerre ou à un fil métallique dressé verticalement dans l'air, rattacha l'autre pôle à la terre et plaça un enregistreur en déviation sur l'électro-frappeur. Aussitôt qu'une onde traversant l'espace agissait sur le conducteur vertical ou antenne, l'enregistreur le marquait par une trace et le cohéreur se remettait automatiquement en état d'enregistrer d'autres ondes.

La même année, M. Marconi, plaçant à quelques kilomètres l'un de l'autre, d'une part un onduleur de Hertz armé d'une antenne, d'autre part un poste installé comme celui de M. Popoff, réussit à transmettre une dépêche en signaux Morse. C'était la dernière étape de la brillante carrière parcourue par les créateurs de la télégraphie sans fil.

Dans tout poste de télégraphie sans fil, il existe un organe commun à l'expédition et à la réception, l'antenne qui lance les ondes électriques ou les recueille : c'est un fil métallique nu ou couvert, suspendu verticalement à la vergue d'un haut mât et bien isolé de ses supports jusqu'à sa soudure aux appareils. Les instruments spéciaux de transmission sont une bobine de Ruhmkorff ayant l'une des bornes de son induit rattachée à l'antenne et l'autre au sol, deux tiges à boules fixées à ces bornes et constituant l'oscillateur, des accumulateurs destinés à fournir le courant, un manipulateur lançant à volonté ce courant dans le circuit primaire, un interrupteur automatique à vibrations rapides

provoquant les décharges oscillantes, un condensateur placé en dérivation sur l'interrupteur afin d'en protéger les contacts. Pour la réception, le poste comprend un cohéreur, à l'une des bornes duquel se relie l'antenne, une pile et un relais du système Lodge, un appareil Morse; le cohéreur a ses électrodes en nickel, en maillechort ou en acier, et renferme de la limaille d'alliages d'or ou d'argent et de cuivre. On fait des cohéreurs dits autodécohérents, qui reprennent automatiquement leur résistance sans le concours d'un teneur, grâce aux propriétés bizarres des contacts imparfaits entre particules de matières poreuses, telles que le charbon, et dont les variations de résistance se traduisent par des bruits susceptibles d'être perçus au moyen d'un écouteur téléphonique : le relais disparaît et il peut en être de même du Morse. À l'inverse des cohéreurs ordinaires, les anticohéreurs augmentent de résistance sous l'influence des ondes; ils n'ont guère qu'un intérêt scientifique.

La diffraction, ou propriété qu'ont les rayons lumineux de contourner un écran pour éclairer à l'arrière des zones placées géométriquement dans l'ombre, s'exerce avec d'autant plus d'intensité que la longueur d'onde est plus grande. Il était donc naturel de chercher à accroître la longueur d'onde des décharges dans les excitateurs de la télégraphie sans fil, pour contourner sur des espaces plus étendus la convexité terrestre. Les appareils en usage ont réalisé des ondes de 100 à 1,000 fois plus longues que celles de Hertz, un milliard de fois plus longues que les ondes lumineuses. D'ailleurs, par suite de la polarisation verticale des ondes électriques, l'énergie rayonne surtout dans le plan horizontal. Ainsi ont été atteintes assez rapidement des portées de plus de 300 kilomètres; la distance de transmission paraît être allée récemment beaucoup plus loin.

À l'inverse des ondes lumineuses, les ondes hertziennes traversent le brouillard. L'action du soleil en réduit notablement la portée. Un de leurs inconvénients est de ne pouvoir aisément se concentrer suivant une direction déterminée, de manifester leur action dans des sens divers, de ne point sauvegarder par suite le secret des correspondances et de se contrarier quand elles divergent de postes même éloignés les uns des autres. On a cherché, sinon à corriger entière-

ment ce défaut, du moins à restreindre la faculté de communication aux postes syntonisés, accordés comme l'étaient l'excitateur et le résonnateur de Hertz; la syntonisation devait, en outre, accroître le rendement et la portée.

2. Appareils téléphoniques. — Parmi les inventions du siècle, l'une des plus admirables est celle du téléphone, qui transmet les sons à distance, en conservant leur valeur, leurs modulations, leur timbre. Deux interlocuteurs séparés par des centaines de kilomètres peuvent converser comme s'ils étaient en face l'un de l'autre; la téléphonie transporte à domicile les auditions théâtrales, permet de suivre dans tous les détails la musique de l'orchestre, la mélodie du chanteur, les tirades de l'acteur, et d'en percevoir les finesses, les éclats, les nuances. Quoi de plus féérique!

L'honneur d'avoir pressenti la téléphonie revient à un télégraphiste français, Ch. Bourseul. En 1854, dans une note sur le problème de la transmission du son et même de la parole, cet agent prévoyait que l'électricité fournirait un jour la solution, au moyen d'appareils relativement simples. Six ans après, Reiss parvenait à transmettre des sons musicaux, mais en ne leur conservant que la hauteur. Enfin, le 14 février 1876, Graham Bell de Boston et Elisha Gray de Chicago présentaient simultanément des demandes de brevets.

En 1877, Bell fit connaître la forme définitive de son téléphone articulant, qui comportait deux appareils identiques, un transmetteur et un récepteur reliés par un circuit. Chaque appareil était formé d'une mince plaque en fer, d'un barreau aimanté et d'une bobine de fil fin entourant l'extrémité de ce barreau. Les vibrations communiquées par la parole à la plaque du transmetteur modifiaient l'aimantation du barreau correspondant, faisaient varier le flux traversant la petite bobine, et les mêmes phénomènes se reproduisaient en sens inverse dans le récepteur, imprimant à la plaque de ce second appareil des vibrations identiques à celles du premier.

Les courants développés dans le système Bell avaient trop peu d'intensité pour permettre de correspondre à grande distance. Edison eut immédiatement l'idée d'emprunter l'énergie électrique à une pile et

de la transformer en courants ondulatoires de haute tension à l'aide de la bobine d'induction. Utilisant des études antérieures de Du Moncel (1856) et de M. Clérac (1865) sur les changements de résistance électrique au contact de deux corps, quand variait la pression de ces corps l'un contre l'autre, il assura la modification d'intensité du courant par une pastille de charbon que comprimait plus ou moins la membrane vibrante du transmetteur. Hughes améliora le microphone d'Edison en recourant à des contacts multiples de charbons (1878).

Depuis, les modèles ont reçu des améliorations qui laissent leur principe intact. Un trait saillant de la dernière période décennale est l'abandon des transmetteurs à crayons pour les transmetteurs à poudres ou à granules, plus favorables à la conservation du volume de la voix sur de longs parcours.

Les lignes des abonnés convergent vers des bureaux centraux, chargés d'établir les liaisons nécessaires. Dans une même ville, il y a intérêt à réduire le nombre de ces bureaux ou mieux à n'en avoir qu'un seul. L'installation se présente sous forme de tableaux affectés à des groupes d'abonnés et desservis chacun par une téléphoniste. Elle comporte des organes variés. Les appels sont signalés par des annonceurs qui déclenche un électro-aimant. Un commutateur, dit *jack*, spécial à chaque abonné et fait de deux blocs de cuivre, dans lequel sont introduites des fiches, permet au bureau central de répondre au poste appelant et d'en recevoir la désignation du correspondant demandé, de le relier par un conducteur souple au jack du poste appelé et de prévenir ce dernier poste au moyen d'un simple bouton. Il y a aussi des clefs de rentrée sur le circuit, des annonceurs de fin, etc.

Pour les bureaux ne recevant pas plus de deux cents ou trois cents fils, on se borne à relier deux tableaux si les correspondants appartiennent à des groupes différents. Lorsque le nombre des lignes devient considérable, il faut rassembler sous la main de l'opérateur les moyens de satisfaire directement aux demandes des abonnés du groupe, le poste appelé fit-il partie d'un autre groupe, et munir, à cet effet, chaque tableau de prises de contact pour toutes les lignes. Cela ne va pas sans de grosses difficultés, au delà de 6,000 à 7,000 lignes.

Un très intéressant tableau de 14,000 lignes figurait à l'Exposition de 1900.

Des dispositions ingénieuses ont été expérimentées en vue de la liaison automatique des lignes sans le concours de téléphonistes. À défaut de solution générale, on a réussi pour la jonction de petits groupes d'abonnés à un tronc commun rejoignant le bureau central, ce qui peut avoir de l'importance dans les pays à population clairsemée.

Un curieux appareil exposé en 1900 était le télégraphone Paulsen. Dans un circuit téléphonique est disposé un petit électro-aimant entre les pôles duquel se déroule à grande vitesse un fil ou un ruban d'acier; les influences magnétiques variables correspondant à la succession des courants ondulatoires de transmission sont enregistrées par ce fil ou ce ruban qui les restitue et reproduit la parole avec une extrême pureté, si on l'emploie ensuite comme transmetteur en le faisant passer entre les pôles d'un électro-aimant semblable au premier et appartenant à un second circuit téléphonique. Le fil impressionné peut d'ailleurs servir à déterminer des enregistrements identiques dans d'autres fils, et l'utilisation simultanée de ces divers fils pour une même transmission amplifie notablement les sons.

3. Matériel des lignes. — Primitivement, les conducteurs des lignes télégraphiques aériennes étaient en cuivre. Ce métal fut bientôt abandonné en raison de son prix et de sa faible ténacité; on employa à peu près exclusivement des fils en fer galvanisé, d'un diamètre de 3 à 5 millimètres; dans des circonstances exceptionnelles, l'acier ou le fer homogène se substituaient au fer ordinaire. Puis il a fallu revenir au cuivre de haute conductibilité pour les lignes télégraphiques franchissant de grandes longueurs ou livrant passage à des émissions successives très rapprochées; ce métal est, d'ailleurs, fourni aujourd'hui dans des conditions excellentes, notamment par l'électrolyse. Le cuivre est d'un usage général pour les lignes téléphoniques. Au besoin, on en corrige la faible ténacité par l'addition de substances telles que le silicium, le phosphore, le chrome. Divers constructeurs ont fait aussi des fils mixtes, en enroulant un ruban de cuivre autour d'une âme d'acier

et en soumettant le tout au tréfilage. Il ne sera pas inutile de rappeler ici que les circuits téléphoniques doivent être fermés métalliquement et non par la terre, dès que d'autres communications électriques les menacent de perturbations.

Les fils reposent, par l'intermédiaire d'isolateurs en porcelaine, en terre cuite ou en verre, soit sur des poteaux en bois injectés de matières antiseptiques (sulfate de cuivre, créosote, etc.), soit sur des supports métalliques.

Bien des ennemis, tels que le givre, le vent, l'humidité, menacent les lignes aériennes, dont l'installation dans les villes présente d'ailleurs de graves inconvénients. Des communications souterraines ont donc été établies, d'abord à l'intérieur des grandes agglomérations, ensuite sur de nombreux parcours ruraux. Les câbles sont formés par la réunion de conducteurs en cuivre, généralement recouverts de gutta-percha ou de caoutchouc, qu'enveloppent des matières isolantes comme le chanvre, le coton, le jute, le bois, la paraffine; leur protection est assurée suivant les cas par des tubes en plomb, des conduites en fonte, des armatures en fil de fer. Depuis longtemps déjà, les approvisionnements de gutta-percha devenaient plus difficiles et plus coûteux; on a pu récemment augmenter l'extraction en ajoutant au procédé de l'incision ou de l'abatage le traitement des feuilles, même sèches, de l'arbre qui devient ainsi exploitable dès les premières années. La rareté et le prix de la gutta-percha ne sont pas ses seuls défauts, spécialement pour la téléphonie; elle a un pouvoir inducteur spécifique trop élevé: aussi devait-on chercher d'autres agents isolateurs. Dès 1889, plusieurs combinaisons satisfaisantes étaient entrées dans le domaine de la pratique: revêtements en perles de bois paraffiné, avec intercalation de couches d'air; enveloppes de coton et paraffine injectée dans les interstices. Ce dernier procédé fut plus tard simplifié: au remplissage complet du tube en plomb par la paraffine on substitua des tampons de la même matière à l'extrémité des sections de l'enveloppe; le papier prit la place du coton. Enfin M. Barbarat, ingénieur des télégraphes français, eut l'heureuse idée de ne plus recourir à la paraffine, de laisser en quelque sorte flotter les conducteurs revêtus de papier, d'amener la ligne au degré d'isolement voulu par le passage

suffisamment prolongé d'air sec, et de fermer le tube à ses deux bouts au moyen de bouchons à vis, qui permettraient, en cas de besoin, l'envoi d'un nouveau courant d'air.

Pour trouver les premières origines de la télégraphie sous-marine, il faudrait remonter au commencement du *xix^e* siècle. En 1807, à Saint-Petersbourg, et en 1815, à Paris, Sömmering allumait de la poudre à l'aide d'un courant électrique passant dans un fil immergé. Ronalds construisait, en 1816, une petite ligne en fils de cuivre isolés dans des tubes de verre, qu'entourait une enveloppe de bois goudronné. Wheatstone proposait, en 1842, de relier Douvres et Calais; il étudiait, à cet effet, la fabrication et la pose des câbles. Presque en même temps (1842), Morse émettait la pensée d'établir une communication entre l'Europe et l'Amérique. Une ligne sous-fluviale de 20 kilomètres fonctionna pendant plusieurs mois sous l'Hudson, en 1845. Cinq ans après, Read coula un premier câble réunissant la France à l'Angleterre; mais les correspondances se maintinrent à peine quelques minutes. Grâce à l'énergie de Crampton, un autre câble put être posé en 1851 au fond de la Manche, dans la direction Douvres-Calais; cette fois, l'entreprise avait pleinement réussi. Néanmoins il restait encore bien des progrès à accomplir dans la fabrication, les méthodes d'épreuve et les procédés de submersion; de nombreux échecs suivirent le succès de 1851.

Les ambitions grandissant, on immergea en 1858 un câble transatlantique mesurant 1,910 milles marins, entre l'Irlande et Terre-Neuve. Durant vingt jours, les deux continents purent communiquer au moyen des récepteurs à miroir de Sir William Thomson. Ces communications s'interrompirent ensuite complètement. Une autre entreprise, celle du télégraphe sous-marin de la mer Rouge et des Indes, avorta de même en 1859. Puis vinrent quelques tentatives plus heureuses entre l'Algérie et la France, ainsi que dans le golfe Persique.

Après un nouvel essai infructueux en 1865, pour la traversée de l'Atlantique, on parvint, l'année suivante, non seulement à relier l'Irlande et Terre-Neuve, mais encore à relever et à compléter le câble de 1865. L'énergie et la persévérance des ingénieurs anglais avaient

PAYS.	LIGNES.	FILS.	BUREAUX.	APPAREILS.
	kilomètres.	kilomètres.		
Allemagne	128,315	472,867	24,471	36,067
Autriche.	33,371	105,795	5,463	8,432
Belgique	6,402	34,277	1,128	2,164
Bosnie-Herzégovine.	2,870	7,481	125	210
Brésil.	23,686	44,645	1,603	"
Bulgarie.	5,182	10,858	228	471
Cochinchine; Cambodge, Bas-Laos..	4,307	6,757	110	215
Dahomey et dépendances.	1,531	1,613	20	29
Danemark.	3,884	13,841	497	540
Égypte.	8,820	22,463	312	597
Espagne.	32,494	75,578	1,491	2,753
France. { Continent et Corse..	140,713	529,317	13,078	16,475
. { Algérie.	10,182	28,614	516	820
Grande-Bretagne et Irlande.	73,725	556,421	11,512	37,952
Hongrie.	22,824	114,741	3,256	5,156
Indes { Office indien.	88,562	291,487	5,178	9,438
britanniques. { Office indo-européen.	4,460	8,738	21	66
Indes néerlandaises	8,784	12,985	421	838
Italie.	41,869	132,423	5,890	10,205
Japon.	27,478	112,324	1,645	3,681
Luxembourg.	613	1,041	170	280
Monténégro	552	688	21	36
Natal.	2,291	5,844	148	361
Norvège.	12,010	41,700	831	1,032
Nouvelle-Calédonie.	928	1,799	36	51

PAYS.	LIGNES.	FILS.	BUREAUX	APPAREILS.
	kilomètres.	kilomètres.		
Nouvelle-Galles du Sud.....	22,648	66,816	961	1,615
Nouvelle-Zélande.....	12,123	33,751	991	1,640
Pays-Bas.....	6,165	22,884	1,003	1,309
Portugal.....	8,345	18,453	443	691
Roumanie.....	6,996	18,110	613	1,172
Russie.....	165,158	497,562	5,908	"
Sénégal.....	2,241	2,660	34	58
Suède.....	9,202	27,992	2,117	3,078
Suisse.....	6,902	21,717	2,108	2,228
Tunisie.....	3,893	8,864	116	195
Victoria.....	10,311	21,426	853	853

II. LIGNES ET POSTES TÉLÉPHONIQUES DANS DIVERS PAYS EN 1900.

PAYS.	RÉSEAUX URBAINS.			CIRCUITS INTERURBAINS.			STATIONS ET POSTES.		
	NOMBRE.	LIGNES.	FILS.	NOMBRE.	LIGNES.	FILS.	STATIONS CENTRALES.	CABINES PUBLIQUES.	POSTES D'ABONNÉS.
		kilom.	kilom.		kilom.	kilom.			
Allemagne.....	2,411	47,304	611,368	5,133	32,077	138,923	2,437	16,612	286,745
Autriche.....	266	"	109,985	105	9,228	18,439	198	520	31,902
Belgique.....	17	"	45,578	116	"	14,440	101	104	17,159
Danemark.....	75	8,104	95,290	369	9,362	18,866	462	1,107	26,660
Espagne.....	67	8,710	39,762	"	"	"	67	31	17,942
France.....	1,199	17,263	291,674	2,031	27,922	108,360	1,206	1,759	69,515
Grande-Bretagne et Irlande.....	"	"	"	1,116	15,557	61,811	"	"	"
Hongrie.....	50	2,277	36,568	83	8,490	29,750	553	171	14,890
Luxembourg.....	83	86	964	168	929	2,529	83	130	1,819
Norvège.....	220	6,823	70,995	2	11,745	42,511	660	1,861	33,378
Pays-Bas.....	47	565	32,480	103	1,615	11,893	104	219	17,278
Roumanie.....	6	539	3,045	1,159	10,114	13,823	157	1,019	1,516
Russie.....	99	7,620	75,762	20	1,565	5,625	135	74	35,131
Suède.....	183	"	100,362	1,096	11,833	61,798	1,304	755	80,055
Suisse.....	318	14,277	126,489	619	"	17,800	318	952	40,849

III. PROGRESSION DU SERVICE TÉLÉGRAPHIQUE EN FRANCE.

DÉSIGNATION.	1860.	1861-1870.	1871-1880.	1881-1890.
Nombre de télégrammes { intérieurs.	568,365	2,437,603	7,989,713	21,323,604
{ internationaux.	151,885	423,721	1,019,161	2,285,039
Montant des mandats { payés en France.	"	"	"	(1) 1,254,919 ^f
{ émis en France.	"	"	"	(1) 1,070,025 ^f
Recettes.....	3,095,656 ^f	9,085,975	18,596,128 ^f	30,646,847 ^f

(1) Moyenne de sept années.

III. PROGRESSION DU SERVICE TÉLÉGRAPHIQUE EN FRANCE. (Suite.)

DÉSIGNATION.	1891-1895.	1896-1900.	1900.
Nombre de télégrammes { intérieurs.	27,256,884	32,369,545	36,723,281
{ internationaux.	2,755,943	2,950,786	3,202,494
Montant des mandats { payés en France.	4,330,476 ^f	4,410,034 ^f	6,637,882 ^f
{ émis en France.	1,889,014 ^f	3,284,139 ^f	6,388,900 ^f
Recettes.	36,115,733 ^f	40,075,223 ^f	43,976,648 ^f

IV. PROGRESSION DU SERVICE TÉLÉPHONIQUE EN FRANCE.

DÉSIGNATION.	1890.	1891-1895.	1896-1900.	1900.
Nombre des abonnés	14,377	24,570	43,492	56,310
Produit des abonnements.....	5,022,750 ^f	6,478,296 ^f	11,318,949 ^f	13,740,922 ^f
Nombre des conversations télépho- niques.....	"	(1) 43,116,183	134,920,398	169,997,343
Produit des conversations télépho- niques.....	192,143 ^f	994,052 ^f	1,675,988 ^f	2,091,282 ^f
Recettes totales.....	5,372,938 ^f	7,553,119 ^f	13,113,980 ^f	16,028,705 ^f
(1) Moyenne de quatre années.				

CHAPITRE VIII.

GÉNIE CIVIL. — MOYENS DE TRANSPORT.

§ 1. MATÉRIAUX, MATÉRIEL ET PROCÉDÉS DU GÉNIE CIVIL.

1. **Matériaux de construction.** — Les bois, les matériaux extraits des carrières, les métaux, les produits céramiques font, dans d'autres chapitres, l'objet d'indications suffisantes pour qu'il soit inutile d'y insister ici. Au contraire, la chaux et le ciment appellent quelques explications : ces éléments de liaison des maçonneries ont un rôle important; leur fabrication sur des bases scientifiques est d'ailleurs une des conquêtes du XIX^e siècle.

Vicat, ingénieur des ponts et chaussées, fut l'initiateur et l'apôtre de l'étude rationnelle des chaux et des ciments. Ses services éclatants lui valurent en 1845 le vote par les Chambres d'une pension viagère, à titre de récompense nationale, et l'attribution par la Société d'encouragement d'un prix sexennal de 12,000 francs; Arago put dire qu'il méritait la reconnaissance publique.

Cet éminent ingénieur publia, en 1818, les résultats de travaux opiniâtres poursuivis depuis plus de six ans sur les pouzzolanes et plus généralement sur le phénomène de l'hydraulicité. Il formulait les trois lois suivantes : 1^o la condition nécessaire et suffisante pour obtenir une chaux hydraulique par la cuisson d'un calcaire est que ce calcaire contienne une certaine quantité d'argile intimement mêlée et disséminée dans sa masse; 2^o on peut toujours fabriquer des chaux hydrauliques en mélangeant une argile quelconque avec de la chaux grasse ou du carbonate de chaux, dans une proportion déterminée, et en faisant cuire le mélange comme un calcaire ordinaire; 3^o la cuisson du calcaire argileux ou du mélange engendre une combinaison entre la chaux et la silice, et le durcissement pendant la prise résulte de l'hydratation du produit ainsi formé. Les principes énoncés par Vicat eurent un immense retentissement. De nombreux essais ne tardèrent pas à en consacrer la valeur et la portée pratique.

Au cours de ses recherches, l'illustre ingénieur avait reconnu et indiqué que certains calcaires argileux, cuits jusqu'à vitrification, puis broyés, donnent un produit doué de qualités hydrauliques exceptionnelles. C'était le germe de l'industrie du ciment Portland qui, née en Angleterre vers 1824, mit vingt-cinq ans à s'y implanter définitivement et à franchir le détroit.

Depuis, la théorie de la formation et de la prise des chaux hydrauliques et des ciments a été étudiée, dans tous les pays, par des chimistes ou des ingénieurs, parmi lesquels je citerai, pour la France, Rivot, Chatoney, M. H. Le Chatelier. Elle paraît aujourd'hui fixée en ses traits principaux. La silice et la chaux sont susceptibles d'un grand nombre de combinaisons; une seule de ces combinaisons, le silicate tricalcique, possède la propriété de faire prise en présence d'une petite quantité d'eau; la prise résulte du dédoublement du silicate tricalcique en chaux et en silicate de basicité inférieure, qui cristallisent par l'hydratation. Ce silicate tricalcique peut naître d'une réaction réciproque de la chaux et de la silice à haute température, mais seulement avec le concours de matières alumineuses ou ferrugineuses jouant le rôle de fondant. Telle est son origine dans la chaux hydraulique, qui renferme toujours au moins 3 p. 100 de matières alumineuses ou ferrugineuses. Telle est aussi son origine dans le ciment de Portland; le silicate tricalcique s'y trouve uni à une abondante gangue alumineuse, qui a fondu pendant la cuisson, permettant ainsi à la réaction de la chaux et de la silice de s'accomplir intégralement; cette gangue détient des produits alumino-calcaires pouvant s'hydrater et participer à la prise, momentanément du moins, mais peu stables en présence d'un excès d'eau et rapidement décomposés par l'acide carbonique. Indépendamment des matières alumineuses ou ferrugineuses, la chaux hydraulique contient une notable proportion (35 p. 100 environ) de chaux libre, dont la présence, sans action sur la prise ultérieure, assure la pulvérisation spontanée, par extinction, des produits retirés du four. Dans le ciment, au contraire, on ne rencontre pas de chaux libre; il sort du four en morceaux scorifiés, qui doivent être amenés par broyage à l'état pulvérulent.

La fabrication de la chaux hydraulique et celle du ciment consis-

tent donc à cuire des matières calcaro-siliceuses et subsidiairement alumineuses, soit naturelles, soit obtenues par voie de mélange. Pour la chaux hydraulique, la quantité de silicate tricalcique formé par la cuisson dépend à la fois de la proportion de silice existant dans la substance enfournée, ainsi que de la température à laquelle cette substance est soumise et du délai pendant lequel se prolonge l'opération; une certaine compensation peut s'établir entre la composition chimique de la matière première et les conditions de la cuisson; dès lors, les règles de fabrication offrent de l'élasticité. Il n'en est pas de même des ciments, pour lesquels la composition du mélange, la température de la cuisson et sa durée ne se prêtent qu'à d'étroites variations.

J'ai rappelé que la décomposition par l'eau du silicate tricalcique anhydre donne du silicate de chaux hydraté. Ce dernier silicate se forme également par l'action directe de la chaux, en présence de l'eau, sur quelques variétés de produits siliceux, naturels ou artificiels, dont la silice est soluble dans les alcalis. Ainsi s'explique comment les pouzzolanes font avec la chaux grasse des mortiers hydrauliques. Là encore doit être cherchée la cause principale de divers faits établis par la pratique, comme la forte adhérence des mortiers sur la meulière.

Au même principe se rattachent l'industrie du ciment de laitier (mélange intime de chaux grasse éteinte avec des laitiers de hauts fourneaux) et l'emploi du béton de chaux grasse et de scories.

L'industrie de la *chaux hydraulique* continue à prospérer en France. Généralement, les usines cuisent des matières naturelles de composition uniforme ou un mélange de matières issues de la même carrière et dont la composition s'écarte peu de la moyenne normale servant de base à la fabrication; dans ce dernier cas, il suffit de mélanger grossièrement les matières à l'enfournement. Les mélanges intimes de matières hétérogènes sont rares.

Historiquement, la fabrication du *ciment de Portland* remonte à 1824; en fait, elle ne date guère que de 1850. Son berceau a été l'Angleterre. Nos voisins n'ont pour ainsi dire pas modifié leurs méthodes

depuis l'origine; ils délaient mécaniquement du calcaire à peu près pur avec de l'argile également pure, souvent empruntée aux vases qui se déposent près de l'embouchure de la Medway dans la Tamise; le mélange rendu suffisamment intime est séché à la flamme perdue des fours de cuisson, découpé en mottes, cuit, trié, concassé et broyé à la meule. Les industriels du Boulonnais opèrent aussi par voie humide, en mélangeant des calcaires argileux dont la composition oscille entre des limites peu éloignées; ce qui caractérise leur fabrication, c'est le délayage des substances dans un grand excès d'eau, condition favorable à l'homogénéité du mélange, à la prise d'essais pendant sa préparation et au changement des dosages reconnus incorrects. Près de Grenoble, les matières premières comprennent, d'une part, un calcaire assez pur, cuit à l'état de chaux grasse et soumis à l'extinction, puis au blutage, et, d'autre part, un calcaire très argileux, cuit modérément et réduit en poudre; chaux grasse et calcaire cuit sont gâchés en pâte ferme; cette pâte est moulée en pains et séchée. D'autres établissements français emploient des marnes et des calcaires marneux de consistance et de composition assez différentes, recourent à un broyage, mélangent les matières à sec dans la proportion requise, humectent ensuite la poudre et la moulent sous pression en briquettes. Ailleurs, on applique, concurremment avec le mélange à l'eau et le mélange à sec, un procédé mixte comportant l'incorporation à la pâte recueillie dans les bassins de décantation d'une certaine quantité de matières broyées et mélangées à sec. Tantôt la cuisson est discontinue; tantôt elle a lieu dans des fours continus, four Hoffmann, four Dietzch, four rotatif américain. Le four Hoffmann présente une série de chambres disposées circulairement et utilisées les unes après les autres pour la cuisson; chacune des chambres peut être mise en communication avec la précédente, la suivante, l'extérieur et la cheminée; le compartiment en chauffe est traversé par un courant d'air qui a parcouru un certain nombre de chambres précédentes, en les refroidissant, et qui parcourra ensuite des chambres consécutives, en les échauffant. Très différent, le four Dietzch se compose de deux cubilots verticaux raccordés par un conduit horizontal; ce conduit va de la base du premier cubilot au sommet du second;

les pains à cuire sont placés en haut du cubilot supérieur, y descendent progressivement, s'échauffent pendant ce trajet, sont projetés dans le cubilot inférieur, y subissent la cuisson et sortent à la partie basse de l'appareil; l'air suit une marche inverse. Le four rotatif américain est essentiellement constitué par un cylindre, à légère inclinaison, qui tourne sur des galets; introduites au sommet, les matières sont évacuées à l'autre bout du cylindre. Quelle que soit leur importance, les fours ne représentent qu'un des éléments de l'outillage; à ces organes essentiels s'ajoutent de nombreux engins dont l'Exposition de 1900 montrait des spécimens et attestait les progrès (concasseurs, broyeurs à boulets, tubes-broyeurs, séchoirs, ensacheurs automatiques, etc.).

En cuisant à une température convenable certains calcaires argileux de composition déterminée, on obtient, au défournement, des matières non vitrifiées, dont la pulvérisation n'est toutefois possible que par le broyage. Le produit broyé comprend de la chaux libre, les éléments du ciment dit *de Portland* et des substances sans influence directe sur la prise, qui remplissent probablement le rôle de pouzzolane à l'égard de la chaux libre. Il se distingue en général par le rapide début de sa prise et doit cette propriété à la présence d'une notable proportion d'aluminate de chaux. Principalement utilisé dans les travaux édilitaires, le *ciment naturel à prise rapide* a eu chez nous son heure de prospérité, quand, sous l'inspiration de Belgrand, la Ville de Paris entreprit de doter d'un égout chacune de ses rues. Cependant la promptitude de sa prise engendre de réelles difficultés d'emploi et, dans beaucoup de cas, on préfère aujourd'hui le ciment de Portland, sauf à en accélérer la prise par des expédients de fabrication ou d'usage. L'Isère, un des centres de production du ciment à prise rapide, fournit aussi du *ciment naturel à prise lente ou demi-lente*, qui donne d'excellents résultats pour les travaux de dallage, les conduites d'eau sous pression, etc., et où les éléments constitutifs du Portland paraissent se trouver en proportion sensiblement plus forte que dans le ciment à prise rapide; cette abondance relative tient vraisemblablement à la température plus élevée ou à la durée plus longue de la cuisson.

L'industrie des *ciments de grappiers* est née de cette remarque, que les matières retenues par le tamis dans le blutage de la chaux hydraulique bien cuite sont, pour une fraction notable, des grains vitrifiés ou grappiers, se comportant, après le broyage à la meule, comme le ciment de Portland. Ces grains, exclusivement formés de silicate de chaux tricalcique, doivent être isolés de la chaux libre et des fragments incuits ou inertes restant avec eux sur le tamis; il y a là une main-d'œuvre longue et compliquée. Beaucoup de fabricants incorporent à leur chaux les grappiers broyés.

On désigne sous le nom de *ciments mixtes* des mélanges de matières, les unes cuites, les autres non cuites, ou de matières cuites dans des conditions différentes. Parmi les ciments mixtes se placent les ciments de laitier, dont la fabrication, entreprise d'abord en Allemagne et en Angleterre, a pris un certain développement. Cette fabrication repose sur les qualités pouzzolaniques que présentent les laitiers des hauts fourneaux, quand des minerais aluminieux sont travaillés avec un dosage convenable de castine. Une condition essentielle est d'étonner les scories à l'eau froide au moment de la coulée, ce qui les empêche de prendre l'état cristallin, sous lequel ils ne seraient pas attaqués par les alcalis. Ainsi granulés, les laitiers doivent être séchés, broyés à la meule et versés, avec 40 p. 100 de leur poids de chaux grasse, dans des tambours où le mélange est intimement brassé au moyen de boudins en fonte ou en silex.

Tandis que grandissait l'industrie de la chaux hydraulique et des ciments, les règles et les procédés d'emploi se sont perfectionnés. Actuellement, le constructeur peut, dans chaque cas, choisir en connaissance de cause un dosage approprié aux matériaux et à l'ouvrage. D'énormes économies ont été réalisées de la sorte pour les bétons qui n'exigent pas une parfaite étanchéité.

Malgré les belles études auxquelles elle a donné lieu, la décomposition des mortiers par l'eau de mer est encore insuffisamment expliquée. Vicat l'attribuait à l'action des sels de magnésie contenus dans l'eau, les acides de ces sels se combinant avec la chaux et la magnésie se précipitant à l'état gélatineux. De nouvelles recherches ont été entreprises vers la fin du siècle, notamment par M. Candlot et M. H. Le Cha-

telier. Ces recherches paraissent bien établir que la réaction chimique est accompagnée d'un gonflement, que la cause immédiate du dépérissement des mortiers est une dislocation mécanique et que ce phénomène résulte de la formation d'un alumino-sulfate de chaux, cristallisant avec 50 p. 100 de son poids d'eau et subissant alors une augmentation de volume, comme l'eau et tous les sels très hydratés. M. Le Chatelier conseille donc la substitution du fer à l'alumine. Le danger de l'alumine semble, d'ailleurs, pouvoir être efficacement combattu par l'addition de pouzzolanes.

Dès 1765, l'illustre Lavoisier avait su pénétrer le mécanisme de la prise du plâtre : « Si (disait-il), après avoir enlevé par le feu au gypse son eau d'hydratation, on la lui rend, ce qu'on appelle communément gâcher le plâtre, il se fait une cristallisation subite et irrégulière, et, les petits cristaux qui se forment se confondant les uns avec les autres, il en résulte une masse très dure ». L'explication subsiste tout entière. Des travaux récents l'ont complétée, en faisant voir comment une petite quantité d'eau suffit pour la transformation, dans un temps déterminé, d'un sel anhydre et amorphe en hydrate cristallisé. Un mémoire remarquable, publié aux *Annales des mines* (1887) par M. H. Le Chatelier, sera utilement consulté à cet égard. On sait aujourd'hui qu'au contact de l'eau tout sel anhydre, soluble et susceptible de s'hydrater, donne une dissolution dépassant la limite de saturation du même sel préalablement hydraté; cette dissolution, en même temps qu'elle dépose des cristaux d'hydrate, s'incorpore des quantités nouvelles de sel anhydre.

Les procédés fort simples de cuisson du gypse n'ont reçu depuis cent ans que des améliorations de détail dues au jeu de la concurrence.

Si sommaire que soit cette revue, quelques faits méritent encore d'être rappelés à propos des matériaux de construction.

Comme l'indique déjà un précédent chapitre, des laboratoires officiels ou particuliers ont été institués pour l'étude et le contrôle des matériaux. Beaucoup sont munis d'un remarquable outillage. Notre

École nationale des ponts et chaussées, par exemple, possède depuis longtemps un laboratoire de chimie et un atelier expérimental spécialement appropriés aux essais des pierres naturelles ou artificielles, des chaux et ciments, des métaux; les épreuves de compression, de traction, de flexion, de choc, d'arrachement, d'usure, de gélivité, etc., s'y effectuent suivant un programme scientifique et avec une extrême précision. Trois laboratoires établis dans les ports de Boulogne-sur-Mer, de la Rochelle et de Marseille sont spécialement affectés aux expériences et aux études sur la tenue des mortiers à la mer. Le Conservatoire national des arts et métiers vient d'être doté d'un magnifique laboratoire dont le caractère est plus général. Pendant la dernière période décennale du siècle, une grande commission interministérielle, formée de savants et de praticiens, a élaboré tout un ensemble de règles sur les méthodes à suivre; son œuvre, d'une étendue et d'une valeur exceptionnelles, fait autorité à l'étranger aussi bien qu'en France.

Les calculs de résistance se sont perfectionnés et introduits dans la pratique courante. Une détermination plus exacte des efforts permet non seulement de mieux régler les dimensions des ouvrages, mais aussi de choisir d'une manière plus rationnelle les matériaux mis en œuvre, de fixer avec plus de discernement les conditions auxquelles ils doivent satisfaire.

Grâce à l'amélioration et à la multiplication des moyens de transport, le constructeur dispose maintenant de matériaux auxquels il lui eût été jadis impossible de recourir sans dépenses excessives. Cet effet bienfaisant des voies de communication s'est notamment manifesté dans les régions dépourvues de pierre à bâtir et y a profondément modifié la structure des habitations.

2. Matériel et procédés des travaux de terrassement. — Bien qu'ils s'exécutent encore le plus fréquemment à bras, les terrassements devaient nécessairement subir la loi commune de l'industrie au XIX^e siècle et faire une large place au travail mécanique. Les engins créés dans ce but sont les excavateurs, les terrassiers et les dragues.

Destinés principalement aux déblais à sec, les excavateurs ont été

inaugurés en France par Couvreur, qui les employa pour la première fois à des extractions de ballast sur le chemin de fer des Ardennes (1859) et qui les utilisa ensuite sur les chantiers du canal de Suez. Leur organe essentiel est une chaîne à godets commandée par un mécanisme que porte un truc mobile sur rails; en remontant le long du talus de la fouille, les godets se remplissent de terre, qu'ils déversent dans une trémie inclinée et de là dans des wagons. Quand l'appareil doit ouvrir des tranchées profondes, il se combine avec un élévateur mécanique dont le rôle est de porter les déblais au niveau voulu. Parfois, les excavateurs travaillent sous l'eau; leur usage sous cette forme se recommande dans les ballastières, et souvent alors on leur adapte des cribleurs; mais, si le terrain devient argileux, les godets nécessitent des modifications qui risquent de laisser retomber une partie des déblais et, par suite, de réduire outre mesure le rendement. À peine y a-t-il lieu d'ajouter qu'en égard à son prix de revient et aux dépenses des installations indispensables pour le desservir, l'excavateur convient exclusivement pour des travaux d'une importance exceptionnelle, concentrés sur un espace restreint. Des modèles nombreux d'excavateurs, pouvant enlever de 60 à 360 mètres cubes par heure, figuraient à l'Exposition de 1900 et attestaient l'ingéniosité que déploient les constructeurs afin d'unir la puissance, la solidité, la légèreté et la simplicité des organes; la transmission par courroies tend à remplacer les engrenages, sujets à des ruptures.

À côté des excavateurs se rangent les terrassiers mécaniques, comportant une seule cuiller à manche et déblayant au-dessus de la plate-forme sur laquelle ils sont établis, tandis que les excavateurs fouillent en contre-bas de cette plate-forme; la cuiller est liée à une grue mobile autour d'un axe vertical, et cette grue repose elle-même sur l'extrémité d'un chariot armé de la machinerie. Créés aux États-Unis, les terrassiers ont trouvé un vaste champ d'action dans l'ouverture du canal de Manchester; l'Exposition de 1900 (annexe du bois de Vincennes) en montrait un spécimen étudié pour fournir 60 mètres cubes à l'heure. Puissants, mais lourds, ces appareils présentent un grand empattement et ne s'accommodent que de larges tranchées.

Les dragues à godets, qui sont les plus répandues, ont pris leur forme

définitive lorsque la chaîne inclinée a remplacé la noria verticale. Primitivement, elles étaient munies de deux élinde; l'encombrement du chenal par les appareils ainsi conçus et la difficulté d'obtenir une concordance satisfaisante dans la marche des deux chaînes font préférer aujourd'hui l'élinde unique. Quelquefois on recourt encore, pour les travaux de fondation, aux dragues à noria verticale; il faut alors allonger ou raccourcir la chaîne selon la profondeur et, de plus, ménager entre les godets un espacement notable afin de pouvoir recueillir les déblais. Les dragues travaillent ordinairement amarrées sur six chaînes manœuvrées à bras ou à vapeur et servant à l'avancement, au recul, ainsi qu'au papillonnage; quand leurs déplacements doivent être fréquents, on peut les munir d'hélices et éviter de la sorte le remorquage. Bien des moyens sont mis en œuvre pour le transport du produit des dragages : un procédé usuel consiste à recevoir les déblais dans des chalands ou des porteurs, qui seront ensuite déchargés, soit à l'aide de grues, soit à l'aide d'un nouveau dragage, ou qui iront se vider dans des bas-fonds, tantôt par des clapets latéraux, tantôt par des clapets inférieurs; dans d'autres cas, des élévateurs, tels que les tabliers transporteurs, conduisent transversalement ces déblais vers la berge; parfois, ils se déversent sur les terrains avoisinants par de longs couloirs à faible pente; ailleurs, ils subissent un refoulement par des conduites, et l'air comprimé peut être mis à contribution pour ce refoulement; certaines circonstances, comme les obstacles que la houle oppose dans les avant-ports à l'accostage des chalands, exigent l'emploi de dragues porteuses; etc.

Une catégorie différente d'appareils de dragage est celle des dragues à succion ou à aspiration, pompant les déblais fluides. L'aspiration se fait par des méthodes diverses; quelques constructeurs utilisent l'air comprimé ou l'eau sous pression remplissant une fonction analogue à celle de la vapeur dans l'injecteur Giffard. Des couteaux hélicoïdaux, animés d'un mouvement de rotation, ou des jets d'eau comprimée désagrègent au besoin les terrains trop consistants.

Les Américains ont des dragues à cuiller fondées sur le même principe que les terrassiers à vapeur.

Des nécessités particulières peuvent commander l'usage d'ap-

pareils mixtes, l'association d'une chaîne à godets et d'organes aspirateurs.

La puissance des dragues a singulièrement grandi pendant les dernières années du siècle. Pour les dragues porteuses à godets, la force de 600 chevaux et le rendement horaire de 300 mètres cubes n'ont plus rien d'exceptionnel. Le savant rapport de MM. de Dartein et Choisy sur les travaux publics à l'Exposition de 1900 cite une drague à succion du Mississippi rendant en moyenne 3,760 mètres cubes par heure et capable d'atteindre 5,960 mètres cubes.

Parmi les outils imaginés pour le déblai des roches à sec, notamment dans les souterrains, la première place appartient aux perforatrices qui forent les trous de mine. Elles travaillent tantôt par percussion, tantôt par rotation.

Les initiateurs des perforatrices à percussion furent Couche et Fowle en Amérique (1849-1851), Cavé en France (1851). Ces appareils compliqués firent leur début en Europe au Mont-Genis (1861); le type créé par Sommeiller fonctionnait à l'air comprimé. Plus tard, les ingénieurs du Gothard se servirent d'outils analogues, également mus par l'air comprimé. Aujourd'hui, le nombre des modèles est considérable; on arrive à 800 coups par minute. Généralement, le fleuret a pour support un cylindre percuteur, lié lui-même à un cylindre propulseur assurant la progression au fur et à mesure que se creuse le trou de mine; il tourne légèrement à chaque coup; des manœuvres de robinets produisent le recul; un courant d'eau rafraîchit constamment l'outil.

Quant aux perforatrices à rotation, inventées par Brandt (1857), elles ont été principalement employées à l'Arlberg et au Simplon. Leur organe essentiel est une couronne en acier garnie de diamants ou simplement dentelée; dans ce dernier cas, la pression doit être beaucoup plus grande et l'avancement a lieu avec moins de rapidité. Au lieu d'être mues par l'air comme les outils à percussion, les perforatrices à rotation le sont par l'eau comprimée.

On a aussi donné le nom de perforatrices à des machines effectuant le déblai sur de grandes sections, par exemple à celle du colonel Beaumont utilisée pour la galerie de reconnaissance du tunnel sous la

Manche. Cette machine à air comprimé creusait d'un seul coup une section cylindrique de 3 mètres de diamètre, au moyen d'une traverse tournante armée de ciseaux.

Jadis, le seul explosif connu était la poudre de mine. Un progrès consista à comprimer cette poudre. Puis vint la nitroglycérine (1847), que les Américains employèrent à l'état liquide, mais qui ne put entrer réellement dans la pratique qu'à l'état de mélange avec des matières inertes, c'est-à-dire de dynamite.

La nitroglycérine peut être associée à d'autres substances, telles que le fulmicoton et le camphre, la dinitrocellulose, etc.

Favier a inventé un explosif spécial (nitrates d'ammoniaque et de soude, naphthaline), offrant des garanties sérieuses au point de vue de la sûreté du maniement.

L'électricité permet l'inflammation des mines à distance. Un appareil usuel à cet effet est le coup de poing de Bréguet.

Souvent, il faut procéder à des dérochements sous l'eau. Des méthodes très diverses y ont été appliquées.

En 1847, Baumgarten, voulant ouvrir un chenal dans la Garonne, avait désagréé le rocher au moyen de barres de fer à tranches aciérées. Après lui, différents ingénieurs se sont servis soit de moutons frappant des barres ou des pieux aciérés, soit de pilons en fer ou en acier doux à chute directe.

Un autre procédé est celui des explosifs. Autrefois, les cartouches étaient déposées à la surface du rocher. Puis on a eu recours aux forages pratiqués à l'abri de batardeaux, dans des cloches à plongeur, dans des caissons à l'air comprimé, ou effectués sous l'eau à l'aide de perforatrices. Le Rhin et le Danube offrent des exemples remarquables de pareilles opérations.

Aux États-Unis, certains massifs ont été dérasés par effondrement de la croûte dans des excavations creusées à l'intérieur de ces massifs.

Les méthodes de percement des souterrains se rattachent à quatre types : méthode anglaise (déblai en trois étages, de la clef vers la

base, et maçonnerie commencée par les pieds-droits; souvent, ouverture préalable d'une galerie de base); méthode belge ou française (ouverture en deux gradins d'une galerie de faite descendant au niveau des joints de rupture, abatage des zones latérales, maçonnerie de la calotte, déblai du stross, enlèvement des masses latérales, maçonnerie en sous-œuvre des pieds-droits); méthode allemande (ouverture de deux galeries latérales à la base, maçonnerie des pieds-droits, percement d'une galerie de faite, abatage des zones à droite et à gauche de cette galerie, maçonnerie de la calotte, déblai du stross en deux ou trois gradins); méthode autrichienne (ouverture d'une galerie centrale de base, percement d'une galerie de faite occupant tout le surplus de la hauteur ou communiquant avec la précédente par des cheminées, abatage de la calotte, puis achèvement du déblai et maçonnerie de l'ensemble en commençant par les pieds-droits ou maçonnerie de la calotte et achèvement des travaux comme dans la méthode belge).

À la traversée des argiles et des sables aquifères, les difficultés sont souvent extrêmes. On ne saurait trop multiplier les mesures de prudence, en particulier pour l'assainissement des terres. Il a fallu, au souterrain de Braye-en-Laonnais (canal de l'Oise à l'Aisne), recourir à l'air comprimé et organiser une chambre de travail avec sas d'entrée et de sortie; au souterrain de Marot (ligne de Montauban à Brive), l'air sous pression était périodiquement insufflé dans le sable de manière à en chasser l'eau.

Parmi les souterrains exécutés au cours du siècle, plusieurs présentent une longueur exceptionnelle : tels ceux de Hoosac aux États-Unis (7,645 mètres), du Mont-Cenis (12,850 mètres), du Gothard (14,984 mètres), de l'Arlberg (10,246 mètres), du col de Tende (8,100 mètres), du Simplon (19,770 mètres). Le tunnel du Simplon, qui s'achève actuellement, est percé suivant une méthode nouvelle : deux galeries parallèles sont forées à 17 mètres d'axe en axe; l'une reçoit immédiatement la section normale pour une voie; l'autre n'a qu'une section restreinte, sauf élargissement ultérieur si le développement du trafic l'exige, et sert à l'introduction de l'air frais, à l'apport des matériaux, à l'écoulement des eaux. Des galeries transver-

sales secondaires réunissent les deux galeries principales. L'attaque du rocher a lieu au moyen de perforatrices hydrauliques à rotation du système Brandt, construites par MM. Sulzer, et l'avancement par attaque varie de 4 à 6 mètres en vingt-quatre heures. De puissants ventilateurs actionnés par des turbines peuvent, sur chaque versant, fournir 50 mètres cubes d'air frais par seconde; l'effet de la ventilation est combiné avec celui de l'eau pulvérisée sous une haute pression.

D'autres souterrains, sans se signaler par leur longueur, ont néanmoins un caractère exceptionnel eu égard à leur situation sous des fleuves ou des bras de mer. Leur exécution a engendré le procédé du bouclier, que Brunel inventa dès 1814 et qui fut ensuite perfectionné, notamment pour l'emploi de l'air sous pression. On appelle bouclier un boisage métallique mobile entretoisé par une cloison transversale qui tantôt s'appuie contre le terrain à fouiller et présente les ouvertures nécessaires au déblai, tantôt laisse à l'avancement une chambre de travail ayant pour toit le prolongement du boisage. Le bouclier est armé sur son périmètre d'un couteau; des vérins à vis ou hydrauliques interposés entre le revêtement définitif fait à l'arrière et l'appareil assurent l'avancement. Bien que le bouclier proprement dit se compose de deux éléments, ossature et cloison transversale, le même nom a été attribué aux simples blindages métalliques employés en terrain sec et peu ébouleux; ces blindages sont formés d'une enveloppe cylindrique avec entretoises, becs et arrière-becs; l'avant-bec protège le travail de la fouille et l'arrière-bec celui du revêtement. Entre autres exemples de l'utilisation du bouclier, avec chambre à air, je citerai les siphons établis par le service des égouts à Glichy et près du pont de la Concorde. Quand les souterrains ont de grandes dimensions, l'usage de l'air comprimé présente des difficultés sérieuses; en tout cas, des précautions spéciales s'imposent afin de faciliter le sauvetage du personnel dans l'éventualité d'une invasion d'eau.

Lorsque des souterrains se développent sous les voies publiques urbaines, le moyen le plus simple est de les exécuter en tranchée ouverte : c'est ce qui a été fait au moins partiellement pour le chemin

de fer de Sceaux entre la gare Denfert et la place Médicis. Mais souvent, les nécessités de la circulation ne sauraient admettre une si grave atteinte, fût-elle restreinte à un délai relativement court. Aujourd'hui, la Ville de Paris s'astreint presque constamment à laisser la voie intacte et même à n'y admettre aucun transport de déblai. Elle a construit par la méthode du bouclier, sans revêtement en fonte, l'égout collecteur de Clichy : dans l'une des parties de cet égout, la voûte seule était maçonnée à l'abri d'un blindage métallique, qui présentait un avant-bec en forme de visière, formait trousses coupantes et reposait sur des rouleaux; dans la seconde partie, l'appareil occupait la section entière. D'autres applications du bouclier ont succédé à la précédente pour le collecteur du boulevard Saint-Germain, pour le chemin de fer de la place Valhubert au quai d'Orsay et pour le métropolitain de Paris; outre des remaniements considérables d'égouts et de conduites d'eau, cette dernière ligne a nécessité, sur une fraction notable de son parcours, l'ouverture de galeries reliant le souterrain à la Seine et affectées à l'évacuation des déblais ainsi qu'à l'apport des matériaux. Le bouclier permet, quand le sol est bon, d'approcher très près des chaussées, de ne réserver qu'une hauteur de 0 m. 60; dans les décombres et surtout au milieu des anciennes maçonneries, il faut, sous peine de fausser l'appareil, réduire la pression à l'avancement, ce qui augmente les dangers d'accidents superficiels.

À propos des souterrains dans les villes, une méthode fort curieuse, celle de la congélation, mérite encore d'être mentionnée. Le capitaine Lindmark a ouvert par cette méthode un tunnel à Stockholm; il transformait le fond du souterrain en une chambre réfrigérante, y envoyait périodiquement de l'air à -55 degrés, congelait ainsi sur une épaisseur suffisante les sables argileux aquifères et pouvait réaliser un travail intermittent dont les phases atteignaient douze heures.

3. Matériel et procédés des travaux de fondation. — Les travaux de fondation présentent une importance capitale pour la stabilité et la durée des ouvrages; ils constituent l'une des parties les plus difficiles de la tâche du constructeur. Mis en face de problèmes sans cesse plus ardu, au fur et à mesure que se créaient ou que se développaient

les instruments modernes de transport, l'art de l'ingénieur a su réaliser d'admirables progrès et surmonter tous les obstacles.

À cet égard, un fait domine le siècle : l'invention de procédés d'une haute perfection pour descendre les fondations en maçonnerie jusqu'au terrain solide à l'aide de l'air comprimé. Dès l'antiquité, Aristote avait songé, dit-on, à immerger une cloche et à enfermer un homme dans l'air qui s'y cantonnait; le moyen âge appliqua l'idée à l'extraction d'épaves au fond de la mer; vers la fin du XVIII^e siècle, Smeaton imagina de renouveler l'air par une pompe. Mais il n'y avait là qu'un embryon des découvertes futures.

En 1839, Triger, devant foncer un puits de 20 mètres de profondeur dans les houillères de Chalonnnes, au travers de sables aquifères, employa un tube de tôle et y refoula de l'air à la pression voulue pour chasser l'eau; les ouvriers placés à l'intérieur du tube enlevaient progressivement les sables qui s'opposaient à la descente de son tranchant; un sas supérieur servait au passage des ouvriers et à l'évacuation des déblais. Cette tentative ayant réussi, Cubitt appliqua en 1851 la méthode de Triger à la fondation du pont de Rochester, dont chaque pile reposait sur 14 tubes en fonte d'un diamètre de 2 m. 13 remplis de béton; les matériaux de la maçonnerie étaient introduits par les écluses supérieures; des contrepoids réglés au moyen de vérins fournissaient la surcharge nécessaire pour empêcher le soulèvement des tubes sous l'influence de la pression intérieure. Le système tubulaire ne tarda pas à être également employé, avec quelques variantes, pour les ponts de Szegedin en Hongrie (1857), de Bordeaux (1859), d'Argenteuil (1861-1862). Dans ce dernier ouvrage, les tubes présentaient à leur base une chambre de travail couverte par un toit tronconique et surmontée d'un second tube concentrique au premier; l'intervalle annulaire était progressivement garni de béton, et ce remplissage constituait le lest indispensable à l'enfoncement.

Brunel faisait entre temps (1854) une application du procédé Triger au pont de Saltash, mais en y apportant des modifications importantes; il descendait, non sans des difficultés inouïes, à 26 mètres de profondeur, un gros tube de 11 mètres environ de diamètre; ce tube était muni à sa partie inférieure d'une chambre de travail à cases

annulaires périphériques, que surmontait un second cylindre de 3 mètres de diamètre; l'air comprimé servait exclusivement à remplir les cases annulaires de maçonnerie, et, en contre-haut, le travail s'achevait à l'air libre, sous la protection de l'armature métallique, qui devait ensuite disparaître. La pénible entreprise de Brunel formait transition entre les fondations tubulaires proprement dites et les fondations pneumatiques sur caissons, telles qu'elles sont aujourd'hui pratiquées.

Ces dernières furent inaugurées au pont de Kehl par Vuigner et Fleur Saint-Denis (1859). L'ouvrage comportait deux piles-culées et deux piles intermédiaires fondées à 20 mètres au-dessous de l'étiage. À l'emplacement de chacun des appuis, les ingénieurs foncèrent des caissons juxtaposés (4 pour les piles-culées et 3 pour les piles intermédiaires). Ces caissons, jouant le rôle de chambres de travail, recevaient trois tubes, dont l'un, descendant plus bas que le tranchant du caisson et débouchant à l'air libre, contenait une noria affectée à l'extraction des déblais, tandis que les deux autres, munis de sas, donnaient passage aux ouvriers et aux matériaux. À mesure que s'enfonçaient les chambres de travail, la maçonnerie des piles était élevée au-dessus du plafond de ces chambres dans un coffrage en bois dépassant le niveau de l'eau. Ainsi les piles se trouvèrent à peu près terminées, quand les caissons atteignirent le sol de fondation; il ne resta plus qu'à remplir de béton les chambres de travail et les cheminées. L'expérience démontra d'ailleurs qu'il eût été possible d'avoir un caisson unique pour chaque pile.

Le procédé auquel le pont de Kehl venait de donner sa consécration fut bientôt utilisé aux ponts de Collonges et de Saint-Louis (États-Unis), avec une modification consistant à disposer les sas dans la zone inférieure et même dans les chambres de travail, afin d'éviter des manœuvres successives de démontage et de remontage. Depuis, d'innombrables ouvrages ont été fondés sur caissons à l'air comprimé. Parmi ces ouvrages, deux méritent une mention spéciale : le troisième bassin de radoub de Missiessy à Toulon et le pont Alexandre III. À Toulon, les ingénieurs ont fait usage d'un caisson de 6,500 mètres carrés, surface qui n'avait jamais été atteinte; l'allongement du bassin,

en cours de travaux, a exigé l'adjonction d'un deuxième caisson de 1,000 mètres carrés. Pour le pont Alexandre III, l'Administration de l'Exposition universelle de 1900 a établi chacune des culées dans un caisson en acier de 1,474 mètres carrés.

Nous avons vu qu'au pont de Kehl les batardeaux surmontant les caissons métalliques étaient des coffrages en bois; plus tard, ces coffrages ont été généralement remplacés par des hausses en métal. En 1883, M. Schmoll a imaginé un système de panneaux amovibles, pouvant être facilement démontés et réemployés.

Aux États-Unis, les caissons se construisent souvent en bois. Un type de ce mode de construction est la fondation du grand pont de Brooklyn, reliant cette ville à New-York (1870-1883).

En Europe, on a cherché à établir des chambres de travail et des fondations exclusivement faites de maçonnerie.

Précédemment, j'ai rappelé l'origine des cloches à plongeur. En 1848, de la Gournerie employa au Croisic un bateau-cloche qu'il immergeait ou qu'il remettait à flot par l'introduction d'eau dans des caisses étanches ou par épuisement de ces caisses. Depuis, on a créé des bateaux à cloche mobile, pourvus de sas à air.

Un système qui s'est répandu vers la fin du siècle est celui des caissons-cloches. Il consiste à entourer d'un caisson l'emplacement de la fondation, à y exécuter la fouille et la maçonnerie inférieure dans l'air comprimé en enfonçant peu à peu la cloche par un lest de fonte ou de matériaux, puis à relever le caisson, à s'en servir pour une autre tranche de maçonnerie, et à poursuivre ainsi le travail jusqu'au dessus de l'eau. De grands caissons métalliques fonctionnant comme cloches à plongeur ont été récemment mis en œuvre à Marseille, pour la fondation des murs de quai de la Pinède, et à Kiel, pour celle de la cale sèche.

Les ouvriers travaillant à l'air comprimé courent certains risques d'accidents, surtout lorsque la surpression dépasse 1 atmosphère et demie (la limite atteinte a été de 3 at. 80). Sous l'influence de la compression, la quantité d'oxygène en dissolution dans le sang augmente;

l'organisme s'y accoutume assez rapidement. Si la décompression est brusque, l'oxygène en excès se dégage sous forme de chapelets de bulles qui déterminent des embolies dans les poumons et dans tous les tissus, d'où l'asphyxie et des hémorragies pulmonaires, méningées, intestinales et même interstitielles; si, au contraire, la décompression est très lente, le dégagement de l'oxygène ne se fait qu'en large surface au seul niveau du poumon. Il faut donc écarter le personnel avec une extrême prudence. Des visites médicales préalables s'imposent, d'ailleurs, absolument. Les sujets reconnus inaptes, soit lors de ces visites, soit en cours d'exécution, doivent être éliminés.

Grâce à ces précautions et à quelques autres, les fondations du pont Alexandre III ont pu s'achever sans accident grave. La surpression y était, du reste, relativement faible.

L'emploi de l'air comprimé n'est pas la seule conquête dont se soit enrichi l'art du constructeur pour les fondations. Une revue même sommaire des progrès si nombreux et si divers accomplis au XIX^e siècle exigerait de longs chapitres. Le cadre de cet ouvrage ne me permet de montrer que par des exemples le chemin parcouru.

En ce qui concerne les épuisements, l'invention des pompes rotatives, des pompes centrifuges, des injecteurs, des éjecteurs, est venue apporter aux ingénieurs des moyens d'action jadis inconnus.

Appliqués pour la première fois par Beaudemoulin au pont de Port-de-Piles (1846-1848), les caissons sans fond avec épuisement ont rendu les plus précieux services.

La vieille et pittoresque sonnette à tiraudes ainsi que la sonnette à treuil et à dé clic, manœuvrées par de fortes équipes d'ouvriers, ont cédé la place, pour les battages importants, aux sonnettes à vapeur : sonnettes à dé clic, pilons, sonnettes dans lesquelles le mouton fait l'office de cylindre à vapeur. Un ingénieux usage des injections d'eau a facilité l'enfoncement des pieux au travers du sable fin. Aux pieux en bois se sont ajoutés les pieux métalliques, et notamment les pieux à vis, inaugurés à Belfast en 1833.

Pour les travaux à la mer, la découverte des chaux éminemment hydrauliques et des ciments Portland a permis de préparer sur la

terre ferme et d'échouer ensuite des blocs artificiels en maçonnerie ou en béton, capables de défier par leur poids les plus violents assauts. Au port de Dublin, les blocs de ce genre ont atteint 350 tonnes, chiffre à la vérité exceptionnel. L'embarquement, le transport et la mise en place de telles masses nécessitent des engins d'une puissance extraordinaire : ponts roulants, bardeurs, chariots porteurs, chalands accouplés entre lesquels sont suspendus les blocs, chalands à évidement intérieur, bateaux-grues, mâtures flottantes, etc.

L'antique méthode de fonçage des puits par havage est passée dans la pratique des grands travaux, pour les ponts, les murs de quai, les écluses, les formes de radoub. Elle a trouvé, le cas échéant, un auxiliaire utile dans les injections d'eau.

Un procédé nouveau, approprié aux terrains inconsistants et compressibles, est apparu un peu avant 1900 et a été largement employé sur les chantiers de l'Exposition. Il consiste essentiellement en une compression mécanique du sol. Le terrain est d'abord criblé de puits à l'aide d'un pilon perforateur de forme conique, qu'on laisse tomber librement d'une grande hauteur; puis, les excavations sont bourrées de matériaux divers ou de béton, au moyen d'un second pilon à profil ogival; il existe un troisième type de pilon, dit d'épreuve, à face inférieure plate.

Enfin le procédé de la congélation a rendu de grands services pour les fondations en terrain aquifère. C'est par ce système que les ingénieurs ont réparé la fondation d'une des presses de l'ascenseur des Fontinettes (canal de Neufossé), toutes les autres parties de l'ouvrage étant laissées intactes à leur place.

4. Matériel et procédés des travaux de maçonnerie. — Une condition essentielle pour faire de bonne maçonnerie est d'y employer du mortier constitué par des matériaux de choix et soigneusement préparé. Autrefois, sur les grands chantiers, le malaxage s'effectuait au moyen de manèges à roues verticales mus par des chevaux. Ces manèges, très encombrants, furent remplacés par des tonneaux en bois, puis en tôle, dans l'axe desquels tournait un arbre vertical muni d'ailettes; souvent l'enveloppe fixe portait elle-même des ailettes s'entre-

croissant avec les premières. Ensuite sont venus les broyeurs à meule et à cuve tournante, appareils beaucoup plus puissants actionnés par une machine et appropriés aux travaux les plus importants. Il existe, à l'étranger, d'autres malaxeurs mécaniques, tels que des cylindres rotatifs avec boulets en fonte.

Jusqu'à l'époque contemporaine, le mortier était surtout considéré comme un remplissage. Son rôle de lien n'a pu se développer franchement qu'avec le progrès des chaux et des ciments. Peu à peu, est née la notion de l'homogénéité des maçonneries; les constructeurs ont reconnu qu'une fois la prise des mortiers terminée, les massifs créés de main d'homme pouvaient constituer des ensembles dans une large mesure assimilables aux produits indivisibles et élastiques de la maçonnerie géologique (poudingues, conglomérats, etc.).

Grâce à leurs pouzzolanes, les Romains avaient accompli économiquement un gigantesque programme d'adduction de sources, en faisant usage de petits matériaux, en utilisant les déchets des carrières de pierre de taille ouvertes pour leurs monuments d'architecture. Leurs successeurs ne gardèrent pas la tradition, soit que le goût du public ne se contentât plus de la puissante beauté des lignes générales et s'attachât davantage aux détails, soit que l'incertaine durée des mortiers conduisit à chercher une sauvegarde dans la masse des éléments mis en œuvre. Quelles qu'aient été les causes du revirement, l'art de bâtir légué au *xix^e* siècle par toute une pléiade d'ingénieurs illustres était une véritable apothéose de la pierre de taille. Vers 1860, l'essor de la fabrication des chaux hydrauliques et des ciments permit aux champions de l'économie un retour aux pratiques romaines, une démonstration éclatante du parti qu'un constructeur habile peut tirer de ces pratiques. Belgrand, chef de la nouvelle école, apôtre convaincu des nouvelles doctrines, prouva l'aptitude de la maçonnerie en petits matériaux, hourdée de ciment, à supporter des réductions d'épaisseur auxquelles l'œil ne s'habitua même qu'avec peine. En superposant, dans la vallée d'Arcueil, l'aqueduc si grêle des eaux de la Vanne à l'ouvrage en pierre de taille construit par Marie de Médicis, précisément sur un point où subsistent des vestiges d'un ancien aqueduc romain, il donna la leçon de choses la plus frappante. Son souci

persistant d'éviter le luxe, chaque fois que la situation s'accommodait d'allures modestes, ne cessa d'inspirer plus tard de nombreux ingénieurs : ce fut une véritable révolution.

La limite extrême de la maçonnerie en petits matériaux est le béton. En France, on confectionne le béton au moyen de bétonnières verticales en tôle armées de barreaux : introduits à la partie supérieure, le mortier et le caillou ou la pierre cassée se mélangent intimement dans leur chute. D'autres pays ont recours à des appareils mécaniques : caisse rotative de mélange, élévateur et bétonnière ; cylindre à ailettes et cylindre à vis d'Archimède faisant le mortier, norias reprenant le mortier et montant les cailloux, bétonnière inclinée à arbre mobile, muni de bras ; récipient à palettes produisant le mortier et le béton ; etc.

François Coignet a vulgarisé, vers 1867, le béton comprimé ou aggloméré, non seulement pour des ouvrages de dimensions restreintes comme les égouts et les buses, mais aussi pour des édifices, des ponts, des viaducs.

Aux premières Expositions universelles internationales de Paris, même à celle de 1855, figuraient déjà des ouvrages obtenus par l'association du béton de ciment et d'un réseau en fer. Cependant on s'accorde en général pour ne faire remonter qu'à Monier (1869) l'invention du ciment armé, et c'est seulement à l'Exposition de 1900 que la combinaison du mortier ou du béton de ciment avec une ossature métallique a reçu sa consécration définitive. Isolé, le béton de ciment ne pouvait résister qu'à des efforts de compression ; l'addition d'éléments métalliques a permis de l'utiliser pour des travaux où entrent en jeu des efforts de toute nature, flexion, traction, compression, torsion. L'emploi du ciment armé en 1900 constituait, dans l'art du constructeur, une innovation assez importante pour que les organisateurs de l'Exposition eussent le devoir d'y recourir largement ; son aptitude à prendre les formes les plus diverses était d'ailleurs un avantage fort apprécié par les architectes ; à un autre point de vue, sa substitution partielle à l'acier réduisait d'autant les approvisionnements d'acier alors si difficiles ; enfin il avait le mérite d'offrir des garanties sérieuses en cas d'incendie. Des expériences probantes attes-

taient du reste que le fer noyé dans le ciment ne s'oxydait pas, que les deux éléments présentaient une parfaite adhérence et qu'en raison du faible écart entre leurs coefficients de dilatation la matière restait à l'abri des désagréments sous l'influence des changements de température.

Les ouvrages très divers en ciment armé établis par l'Administration de l'Exposition mesuraient une superficie de 54,220 mètres carrés. Ils se rattachaient à des systèmes différents, dont chacun se caractérisait par un mode particulier de distribution du métal. Si l'Exposition ne pouvait, eu égard à son caractère essentiellement éphémère, donner un témoignage de la vitalité des constructions en ciment armé, elle a du moins attesté leurs qualités de résistance et d'économie. Le ciment armé se prête à des applications multiples : voûtes de cave, planchers, citernes, réservoirs, canalisations d'eau, égouts, blindages militaires, murs de soutènement, ponts, constructions industrielles, etc. Trois conditions principales s'imposent pour son succès : disposition judicieuse du métal dans le béton ; usage de matériaux d'une qualité irréprochable ; soins extrêmes dans la confection du béton. Un système de béton fretté, dont l'invention est postérieure à 1900, semble devoir étendre encore le domaine du ciment armé.

Les blocs artificiels, précédemment cités à propos des fondations à la mer, fournissent un exemple remarquable des grands services que peuvent rendre le béton et la maçonnerie de petits matériaux. Il eût été impossible de demander à aucune carrière et chimérique de vouloir transporter des blocs monolithes d'un poids si élevé. La Belgique a fait des massifs pesant de 3,000 à 4,500 tonnes, en échouant des caissons de ciment armé et en les remplissant ensuite de béton.

Un progrès notable s'est introduit dans les habitudes des constructeurs. Dès 1867, Viollet-le-Duc critiquait la pratique consistant à expédier de la carrière au chantier des blocs de dimensions quelconques, puis à les débiter sur le lieu d'emploi suivant la conception de l'architecte. Il signalait avec insistance l'exemple des carrières belges de petit granit et des belles carrières de l'Échaillon, près de Grenoble, dont les produits partaient à taille finie, prêts pour la

mise en place. Son appel a été entendu : les pierres arrivent entièrement taillées, si elles sont dures, et au moins dégrossies, dans le cas contraire; ce mode de faire contribue à prévenir l'encombrement des chantiers et procure une économie, notamment pour le transport. Les carriers et les entrepreneurs substituent d'ailleurs, autant que possible, les procédés mécaniques au travail manuel : une des curiosités de la section belge, en 1889, était le fil hélicoïdal à couper le marbre, cordelette d'acier enrobée de grès fin et courant avec une vitesse de 30 mètres par seconde; depuis, les scies diamantées comme celle qui servit à la construction du grand palais des Champs-Élysées n'ont pas eu moins de succès.

L'instrument traditionnel de montage des maçonneries en élévation est la sapine. On y emploie aussi d'autres engins, spécialement des grues à balancier mobiles sur rails; ces derniers appareils, parfois montés sur un plateau rotatif, conviennent aux édifices de grande hauteur; les chantiers de l'Exposition universelle de 1900 aux Champs-Élysées en montraient un beau spécimen.

Cette exposition présentait une extrême variété de revêtements et de cloisonnements légers. Deux types méritent d'être mentionnés : le fibrocortchoina et le métal déployé. Le premier se compose de planches obtenues en noyant des nattes de roseau dans du plâtre. Quant au métal déployé, il est constitué par des feuilles de tôle mince, dans lesquelles on découpe mécaniquement des losanges très rapprochés et imbriqués, de manière à en faire des sortes de grillages; entre les emplacements des losanges subsistent des filets métalliques de quelques millimètres, qui sont partiellement relevés et donnent des aspérités propres à retenir le plâtre.

5. Matériel et procédés des constructions métalliques. — Les travaux préparatoires à l'atelier se sont peu à peu perfectionnés et ont acquis une précision remarquable. Une part de plus en plus large a été faite aux opérations mécaniques.

On sait toute l'importance d'une bonne rivure. L'industrie dispose aujourd'hui d'excellentes machines pour le poinçonnage ou le forage des trous et pour l'application des rivets, soit dans l'usine, soit à

pied d'œuvre; elle demande, selon les cas, la force motrice à la vapeur, à l'eau sous pression, à l'électricité. Dans les constructions en acier, il faut aléser les trous poinçonnés, afin d'enlever la tranche de métal qui a subi une altération pendant le poinçonnage. Cette main-d'œuvre complémentaire était rigoureusement prescrite pour les ouvrages définitifs de la dernière Exposition.

D'une manière générale, les constructeurs évitent le travail à chaud de l'acier laminé toutes les fois qu'il s'agit de pièces principales et résistantes, même de pièces à gabarier suivant des profils gauches; les pièces d'ornement admettent au contraire ce mode de travail, sans lequel, d'ailleurs, les courbures à faible rayon seraient difficilement réalisables. L'usinage des pièces en acier moulé exige des soins minutieux; mon rapport administratif et technique sur l'Exposition de 1900 contient à cet égard des indications détaillées, dans le chapitre relatif au pont Alexandre III.

En ce qui concerne la répartition entre les travaux à l'atelier et les travaux à pied d'œuvre, deux méthodes différentes ont chacune leurs adeptes. L'une d'elles tend à réduire au minimum les opérations sur le chantier de pose, à pousser en conséquence jusqu'aux limites extrêmes les opérations préparatoires de l'atelier; très simplifié, le montage s'effectue sans ajustage et sans retouche, ne nécessite qu'un nombre restreint de rivures, diminue le travail manuel au profit du travail mécanique, assure une précision rigoureuse aux diverses parties de la construction: c'est la méthode française. Dans la Grande-Bretagne et aux États-Unis, les pièces arrivent de l'usine plutôt dégrossies que finies; après les avoir présentées, le monteur les retouche, s'il y a lieu, et en achève la préparation.

Le levage des charpentes métalliques d'édifices est effectué au moyen de treuils, de chèvres, de grues, de bigues, d'échafaudages fixes ou roulants. À peine est-il utile de rappeler les admirables installations faites en 1887 et 1888 pour le montage de la tour Eiffel, les grues légères et puissantes qui cheminèrent de proche en proche jusqu'à la troisième plate-forme en s'accrochant aux pièces de l'ossature. La galerie des Machines offrit à la même époque un autre modèle justement remarqué. Eu égard à leur variété et à leur importance,

les travaux de l'Exposition de 1900 ont mis en présence des combinaisons multiples, dont la plupart attestaient beaucoup d'ingéniosité. Parmi ces combinaisons, l'une des plus intéressantes a été celle du montage funiculaire de la salle des Fêtes, avec câbles suspendus à la charpente de l'ancienne galerie des Machines et munis de dynamomètres.

Fréquemment, le montage des ponts métalliques soulève des problèmes très délicats; en nombre de cas, les difficultés dues à la grande ouverture des ouvrages se doublent des obstacles que la hauteur de ces ouvrages au-dessus du fond de la vallée, les impérieuses nécessités de la navigation ou celles de l'écoulement des eaux opposent à l'établissement d'échafaudages. Dans la rédaction des projets, les ingénieurs doivent toujours se préoccuper des dispositions qui pourront être adoptées pour le levage et la pose. Certains procédés sont classiques: tels le montage sur cintre des arcs en métal fondu, le lançage des poutres droites préalablement assemblées sur la rive, le levage par cheminement et en porte à faux des arcs en métal laminé s'équilibrant sur leurs appuis, etc. Mais, alors même que l'ouvrage à exécuter se rapproche d'un type connu, les circonstances locales s'accommodent rarement d'une reproduction pure et simple de dispositifs antérieurement appliqués; elles commandent presque toujours des variantes inédites et ouvrent un champ nouveau au génie inventif du constructeur. À ce point de vue, l'Exposition de 1900, avec le pont Alexandre III et les passerelles sur la Seine, a été tout un enseignement, placé sous les yeux du grand public. Les cintres des arcs en acier moulé du pont Alexandre III ne pouvant prendre d'appuis dans le chenal navigable étaient suspendus à une passerelle supérieure de service en acier laminé qui se déplaçait et permettait le montage progressif par groupes de deux arcs; cette passerelle à poutres droites, de 120 mètres d'ouverture, soulagée au besoin à l'aide de deux palées, avait donné lieu à trois opérations successives d'assemblage et de lancement; des vérins dynamométriques servaient au réglage des arcs. Des renseignements précis au sujet de ce montage et de celui des passerelles sont consignés dans mon rapport administratif et technique sur l'Exposition.

6. **Matériel et procédés divers des chantiers.** — Certains instruments et certains procédés ont été omis à dessein dans le rapide exposé qui précède, parce qu'ils ne sont pas nettement spécialisés et intéressent plusieurs catégories de travaux. Je me borne à une simple énumération des plus importants.

Les sondages destinés à faire connaître la nature du terrain sur lequel seront exécutés des ouvrages ont réalisé de très grands progrès au cours du siècle.

Partout, l'usage des voies ferrées s'est répandu pour la desserte des chantiers. Les wagons sur voie large et les wagonnets sur voie étroite portative fournissent des moyens de transport d'une puissance incomparablement supérieure à celle des camions et procurent souvent une précieuse économie.

Un mode de transport peut-être insuffisamment développé pour les travaux publics est celui des câbles aériens. Ces câbles se rattachent à deux systèmes : système dormant, dans lequel les bennes chargées et les bennes vides en retour circulent sur deux câbles fixes et sont entraînées par un câble sans fin moteur ou tracteur ; système à mouvement continu, qui comporte un fil unique, à la fois porteur et tracteur.

À l'Exposition de 1900 (annexe du bois de Vincennes), figurait un intéressant engin de création récente, le *Temperley transporter*. Le modèle produit par l'exposant était un transporteur à 50 mètres, effectuant les opérations de levage, de transport, de descente et de décharge au moyen d'un câble que commandait un moteur ; ce câble actionnait une benne par l'intermédiaire d'un chariot mobile roulant sur une poutre aérienne.

Les engins mécaniques de levage déjà mentionnés à diverses reprises ont apporté au constructeur des moyens généraux d'action dont il ne disposait pas autrefois.

Enfin je ne puis me dispenser de dire un mot du *scaphandre* inventé par Cabirol, puis perfectionné en France par Rouquayrol et Denayrouse, en Angleterre par Heincke. Ce vêtement de plongeur, muni d'un casque à hublots avec adduction d'air pur comprimé et évacuation d'air vicié, est utilement employé aux reconnaissances et aux menues réparations sous l'eau.

§ 2. TRAVAUX PUBLICS ⁽¹⁾.

1. **Ponts.** — Le XIX^e siècle n'a peut-être pas produit de plus beaux *ponts en maçonnerie* que le siècle précédent. Cependant les progrès accomplis ont été considérables. Sans passer en revue tous ces progrès, je dois rappeler du moins les principaux.

Autrefois, les constructeurs ne possédaient que des données empiriques au sujet de la stabilité des voûtes. La science moderne s'est emparée du problème, en prenant pour point de départ les belles expériences de Boistard, ingénieur en chef des ponts et chaussées. Ces expériences, entreprises à propos de la construction du pont de Nemours dont le surbaissement inusité atteignait presque $1/16$, firent en 1822 l'objet d'une publication très intéressante. Dès l'année suivante, Lamé et Clapeyron écrivaient un magistral mémoire sur la théorie des voûtes. Mais, si la méthode imaginée par Lamé et Clapeyron suffisait à l'appréciation générale de la stabilité, elle ne donnait ni la valeur des pressions exercées ni leur répartition; on ne pouvait en déduire des règles précises pour le choix des dimensions à assigner aux différentes parties de la voûte et de ses pieds-droits. D'éminents ingénieurs et plusieurs savants reprirent la question; leurs études aboutirent à des solutions remarquables, soit par l'analyse mathématique, soit par des procédés graphiques, simples et élégants. Parmi les auteurs dont la contribution a été la plus importante se rangent Méry, Poncelet, Carvallo, Yvon Villarceau, de Saint-Guilhem, A. Durand-Claye, Decomble, Dupuit, le général Peaucellier, Cunq. Sans déterminer d'une manière précise la position de la courbe des pressions, la méthode graphique d'A. Durand-Claye en limite beaucoup l'indétermination, ce qui peut être fort utile quand les circonstances obligent à s'écarter notablement des formes ou des proportions habituelles.

La théorie des voûtes biaises est l'œuvre du XIX^e siècle. Deux émi-

⁽¹⁾ Sont renvoyées : 1^o à l'un des paragraphes suivants de ce chapitre, les indications spéciales sur les chemins de fer; 2^o au chapitre

de l'agriculture, celles qui concernent le génie rural.

nents ingénieurs français, Lefort (1839) et Graeff (1852), en ont été les créateurs. Aujourd'hui, les appareils consacrés sont : l'appareil hélicoïdal s'appliquant dans toute l'étendue de la voûte ou seulement entre les joints de rupture (Léveillé); l'appareil orthogonal parallèle; l'appareil orthogonal convergent; l'appareil circulaire convergent (Alfred Picard, 1876); l'appareil par arcs droits. L'appareil cycloïdal, dû à Hachette (1854), mérite aussi d'être mentionné à titre historique. De la Gournerie, Dupuit et M. Ed. Collignon ont brillamment concouru à la détermination des tracés géométriques ou des équations. En même temps que la théorie se constituait, la pratique arrivait à bien connaître les mouvements susceptibles de se produire pendant la construction et les mesures capables de prévenir ces mouvements.

J'ai précédemment indiqué les conquêtes de l'art du constructeur au point de vue des fondations; il est inutile d'y revenir ici. Des règles plus rationnelles et mieux en harmonie avec la nature des matériaux de liaison se sont successivement formées pour la distribution et la confection des maçonneries. Alors que Perronet, loin de redouter les tassements sur cintre ou au décintrement, leur attribuait certains avantages, nous nous attachons au contraire à les réduire par des précautions convenables : emploi de cintres très fixes et fortement chargés à leur sommet; appareillage soigné; sage fixation de l'épaisseur des joints; usage de mortier très hydraulique, additionné de ciment en temps humide ou froid; construction des voûtes par rouleaux et par tronçons; maçonnerie rapide entre les joints de rupture; élévation des tympans jusqu'à ces joints avant le décintrement; choix du moment propice pour le décalage des cintres et conduite prudente de cette opération; etc.⁽¹⁾ La tendance à éléger les tympans au moyen d'arcades s'est accentuée, surtout vers la fin du siècle; des élégissements méthodiques sont également ménagés dans les appuis.

⁽¹⁾ Il peut être intéressant de rappeler ici le remarquable système de construction appliqué, dans le dernier quart du xviii^e siècle, aux deux grandes voûtes de 150 pieds des ponts de Lavaur et de Gignac (Languedoc). Ces voûtes furent montées sur des cintres en ma-

çonnerie, par l'intermédiaire de couchis en bois avec cales; leurs joints, extrêmement minces, avaient seulement 1 ou 2 millimètres. Elles n'éprouvèrent que des tassements insignifiants, comparables à ceux de nos voûtes modernes.

Une innovation récente, qui a pris naissance dans le Wurtemberg, consiste à articuler les voûtes et à leur étendre ainsi un système antérieurement réservé aux arcs métalliques. Ces rotules, disposées à la clef et à la retombée des arcs, sont, selon les cas, en plomb, en acier ou en granit. Elles fixent la courbe des pressions et permettent d'établir des ouvrages hardis, légers, économiques, à la condition d'employer des pierres résistantes ou du béton de ciment Portland; l'expérience montre que, dans la limite d'une portée de 50 mètres, les voûtes en béton articulées admettent un surbaissement du dixième.

S'il fallait juger le mérite des ponts en maçonnerie d'après l'amplitude de leur ouverture, le *xix^e* siècle n'accuserait pas de progrès par rapport au passé. En 1377, Barnabo Visconti avait jeté sur l'Adda, à Trezzo, une arche de 72 m. 25, qui fut détruite quarante ans plus tard dans une guerre locale, et, depuis, cette ouverture n'a été ni dépassée, ni même atteinte, avant 1900. D'après le rapport de MM. de Dartin et Choisy sur l'Exposition de 1900, les plus grandes voûtes du siècle sont celles de Cabin-John (États-Unis, 67 m. 10), de Jaremce (Galicie, 65 mètres), de Lavour (France, 61 m. 50), du Gour-Noir (France, 60 mètres). À cette liste, il y aurait lieu d'ajouter quelques autres ouvrages : le pont de la Gutach (Allemagne, 64 mètres), celui du Prince Régent (Allemagne, 62 mètres), celui de Chester (Angleterre, 61 mètres). Peu après 1900, M. Séjourné, ingénieur en chef des ponts et chaussées de France, a construit à Luxembourg une arche de 84 mètres.

La majesté des ouvrages en maçonnerie peut tenir non seulement à l'ouverture de leurs arches, mais aussi à leur hauteur. Parmi les viaducs édifiés au cours du siècle et mesurant 50 mètres de hauteur ou davantage, se placent notamment ceux de Chaumont-sur-Marne (50 mètres), de Port-Launay (52 mètres), de la Gartempe (53 mètres), de la Selle (53 mètres), de Saint-Laurent (53 mètres), de Pompadour (55 mètres), de l'Ain (55 mètres), du Gouet (57 mètres), de Morlaix (57 mètres), d'Ariceia près d'Albano (60 mètres), de la Cruzeze (64 mètres), de l'Eltersthal (70 mètres), de Villefort (73 mètres), du Goltzcherthal (80 mètres), et le magnifique aqueduc

de Roquefavour élevé par de Montricher (83 mètres). L'effet, pour ces ouvrages, doit être cherché surtout dans l'ordonnance générale, dans l'harmonie des grandes lignes, dans les saillies nettement accusées, dans la forme rationnelle des appuis qui fatiguent beaucoup plus vers la base qu'au sommet et qui doivent en outre offrir une résistance absolue au déversement. Malgré certains défauts, l'un des viaducs les plus remarquables par sa valeur architecturale est celui de Dinan, dont les dessins ont été donnés par Léonce Reynaud.

C'est en France que se rencontrent les ponts ou viaducs en maçonnerie le plus justement appréciés pour leurs heureuses proportions et la pure sobriété de leur décoration. Sans sortir de la capitale ou des grandes villes de province, qui n'a admiré les ponts d'Iéna, de l'Alma, du Point-du-Jour, à Paris, celui de Rouen, celui de Bordeaux, celui de Tilsitt à Lyon, etc.? L'Italie a fait, de son côté, preuve d'un goût très sûr dans plusieurs de ses ponts. À côté d'ouvrages massifs, l'Angleterre en montre d'autres qui se recommandent par leur rare élégance.

Les ingénieurs français ne le cèdent du reste, comme constructeurs, à ceux d'aucun pays étranger. Mon rapport général concernant l'Exposition universelle de 1889 relatait, à titre d'exemple, les beaux travaux du pont de Lavour; édifié de 1882 à 1884 par MM. Robaglia et Séjourné. Ces habiles ingénieurs s'étaient appliqués à faire de l'ouvrage terminé un ensemble homogène et élastique; ils avaient eu soin d'établir la voûte en trois rouleaux superposés, de n'entreprendre chacun des rouleaux supérieurs qu'après achèvement et prise du rouleau précédent, ce qui soulageait le cintre, et de ne maçonner définitivement qu'en dernier lieu, pour chaque rouleau, les joints menacés de fissures : le tassement à la clef, lors du décintrement, resta inférieur à 0 m. 001, alors qu'au siècle dernier les ponts de Nogent-sur-Seine et de Neuilly s'étaient respectivement abaissés de 0 m. 34 et de 0 m. 26, malgré leur moindre ouverture (39 mètres).

Non moins intéressant que le pont de Lavour, celui de Luxembourg comprend une arche centrale de 84 mètres d'ouverture et 31 mètres de flèche, avec tympans évidés par huit arcades, et deux arches de rive en plein cintre. Sa largeur est de 16 m. 50. Il se compose

de deux ponts jumeaux, mesurant sous la corniche 5 m. 25 entre les têtes et réunis par une dalle en béton de ciment armé. Cette disposition économique a permis d'établir successivement les deux parties jumelles de l'ouvrage et, dès lors, de réduire dans une forte proportion la dépense des cintres, qui étaient constitués par cinq fermes retroussées, avec sous-fermes polygonales maintenues à l'aide de tendeurs en fil d'acier. Les voûtes ont été construites en trois rouleaux sectionnés et leur décintrement n'a abaissé la clef que de 6 millimètres.

Presque abandonnés actuellement dans la plupart des pays, les *ponts en bois* n'en ont pas moins rendu les meilleurs services pendant une grande partie du siècle. Grâce à eux, l'Amérique du Nord a pu multiplier rapidement ses voies de communication. La France elle-même y a eu recours non seulement pour supprimer des bacs ou passages d'eau, mais aussi pour livrer passage à ses premiers chemins de fer (ligne de Paris à Rouen).

Ces ponts se classent en trois catégories : ponts à poutres droites simples, d'une ouverture nécessairement restreinte; ponts en arc; ponts à poutres droites composées.

Wiebeking, ingénieur bavaois, fut un des plus habiles constructeurs de ponts en arc; il en établit à Scharding et à Bamberg, qui présentaient une ouverture de 58 m. 30 pour le premier et de 62 m. 75 pour le second, avec des surbaissements de $\frac{1}{11}$ et de $\frac{1}{9}$. Allant beaucoup au delà, Brown, ingénieur américain, franchit une vallée de 53 mètres de profondeur par un arc de 84 mètres : l'ouvrage, dit de Cascade-Gleen, ne fléchissait que très légèrement sous la charge des trains. On cite un pont encore plus hardi, d'une portée de 103 mètres, antérieurement construit à Philadelphie et désigné sous le nom de Colossus.

C'est en Suisse qu'ont été inaugurés les ponts à poutres droites composées, de grande ouverture : les frères Grubenmann avaient, au siècle dernier, jeté sur la Limmat, près de l'abbaye de Wettingen, une travée de 119 mètres, que des nécessités militaires conduisirent à incendier en 1799. Aux États-Unis, les applications importantes

datent de 1840 et se rattachent à différents systèmes : système Town, permettant l'emploi de bois d'un très faible échantillon, mais n'offrant que des garanties insuffisantes de solidité pour des ouvrages définitifs; système Long, présentant des conditions meilleures de solidité et de durée; système Howe, légitimement estimé en Europe comme en Amérique; système Burr, dans lequel les poutres droites sont renforcées au moyen d'arcs. La portée des poutres a atteint 54 mètres environ, avec le système Howe, et 76 mètres, avec le système Burr. De nombreux viaducs en bois attesteraient, au besoin, l'audace des Américains : tel celui de Portage (chemin de fer de l'Érié), dont le tablier était à 69 mètres au-dessus du niveau de la rivière et qui fut brûlé par accident en 1875.

Les *ponts métalliques* sont nés en Angleterre vers la fin du XVIII^e siècle. C'est à Coalbrookdale, sur le Severn, que fut établi le premier grand ouvrage de ce genre (1779); il consistait en une arche de *fonte*, plein cintre, dont le dessin paraissait inspiré par le désir d'imiter la maçonnerie de pierre de taille et de constituer une voûte suivant le type traditionnel, sauf substitution de claveaux métalliques ajourés aux claveaux de pierre. Jusqu'en 1850, l'arc en fonte demeura la seule solution adoptée par les constructeurs; mais les règles scientifiques remplacèrent progressivement la méthode empirique, qui, originairement, servait seule au calcul des dimensions. La fonte continua, d'ailleurs, à être employée après 1850, concurremment avec le fer laminé; ses qualités décoratives devaient, en effet, dans nombre de cas, lui assurer les préférences des ingénieurs. Cependant des accidents réitérés la discréditèrent pour les ponts de chemins de fer à circulation intensive, bien que les cassures dues aux trépidations fussent en général limitées à des pièces accessoires.

Entre autres ponts en fonte, on peut signaler : à Paris, ceux des Arts (1803), d'Austerlitz (1806), du Carrousel (1835), de Solférino (1859), de Saint-Louis (1861), de Grenelle (1875), de Sully (1876), ainsi que le pont au Double (1882); dans les départements, ceux de Nevers, de Tarascon, de la Voulte, de Lyon sur le Rhône, de Suresnes, de Vichy; en Algérie, ceux de la Chiffa, de l'Oued-el-

Hammam, d'El-Kantara. Le maximum d'ouverture (75 mètres) a été réalisé aux ponts de Sunderland et de Southwark, en Angleterre; ensuite viennent les ponts de Saint-Louis à Paris (64 mètres), de Rock-Creek aux États-Unis (61 mètres), de Tarascon (60 mètres).

La Grande-Bretagne offre plusieurs exemples d'un type original, dans lequel le tablier est suspendu à des arcs.

Afin de restreindre autant que possible les variations du travail dans les différentes parties de l'arc, les ingénieurs ont disposé des articulations à la clef et aux naissances; la courbe des pressions a ainsi trois points invariables.

Vers le milieu du siècle, parurent, au delà de la Manche, les premiers ponts en *fer* à poutres droites. Débutant par un coup de maître, R. Stephenson recula brusquement en 1850 les limites jusqu'alors opposées à l'audace des ingénieurs; il donna, au pont Britannia, l'exemple d'une poutre formée de petits éléments en tôle et fers profilés, avec assemblage par rivure, qui franchissait sans appuis intermédiaires des portées de 140 mètres. Toujours les productions d'un homme de génie laissent une impression durable. Pendant de longues années, les constructeurs n'essayèrent pas d'aborder des tracés où il eût fallu dépasser la nouvelle limite admise d'emblée par Stephenson. En France, notamment, le maximum d'ouverture des travées fut de 73 mètres environ à Langon, de 59 mètres à Moissac, de 73 m. 50 à Bordeaux, de 52 mètres à Lorient, de 43 mètres à Chalonnnes, de 40 mètres à Argenteuil, etc. Le fait capital de cette période a été l'abandon de la forme tubulaire à parois pleines que Stephenson avait adoptée, probablement par assimilation du travail d'assemblage des tôles avec celui de la construction des chaudières à vapeur : peu à peu, l'emploi des fers dans les charpentes avait habitué l'œil aux formes élégies; ces formes ne tardèrent pas à s'emparer des ponts, et le treillis, tantôt multiple, tantôt réduit à une extrême simplicité, remplaça la paroi pleine des poutres tubulaires.

En même temps que se développaient les poutres droites de hauteur constante, l'Angleterre, l'Allemagne et la Hollande expérimentaient des variantes : bow-strings avec une seule semelle courbe, offrant l'aspect d'un arc au repos (Brunel); bow-strings avec deux

semelles courbes, figurant un arc tendu; type allemand avec deux semelles courbes, présentant la forme d'un fuseau tronqué à ses extrémités; type hollandais, où la semelle supérieure courbe et la semelle inférieure droite se reliaient aux extrémités par des montants verticaux. Ces variantes tendaient à économiser le métal, sans exercer d'efforts horizontaux sur les appuis.

De leur côté, les Américains employaient tantôt des poutres armées (types Fink et Bollmann), tantôt des poutres à deux semelles horizontales (types Pratt, Howe, Petit, Linville, Post, etc.). Ils appliquaient d'ailleurs des méthodes de construction profondément différentes des méthodes européennes. L'Europe restait fidèle à la contexture initiale; elle persistait à mettre en œuvre, dans toutes les parties de l'ouvrage, des éléments identiques, quel que fût le rôle de ces éléments, et à les réunir par des assemblages qui leur donnassent une invariable solidarité. Au contraire, les États-Unis adaptaient les formes à la nature des efforts de tension ou de compression et assemblaient les pièces par des articulations; ils étaient ainsi plus sûrs de la manière dont travaillaient les organes, mais perdaient des garanties en cas de rupture d'une pièce.

Les ponts à poutres droites n'étaient pas les seuls pour lesquels le fer fût mis à contribution. Ce métal servait également à constituer des arcs. Szegedin eut en 1858 le premier ouvrage important avec arcs en fer : 8 arches de 41 mètres d'ouverture livraient passage à une voie ferrée par-dessus la Theiss; la fibre neutre affectait un tracé parabolique, disposition favorable au point de vue de la résistance aux déformations et reproduite plus tard dans divers ponts. L'exemple de Szegedin fut bientôt suivi pour une série de ponts, dont la portée allait sans cesse grandissant : pont de Saint-Just, 46 m. 26; pont de la Chiffa, 47 m. 15; pont du Cinca, 70 mètres; pont d'Arcole à Paris, 80 mètres; pont de Coblenz, 96 mètres; pont de l'Erdre, 95 mètres. Au pont d'Arcole, de vigoureux ancrages rattachaient les arcs à chacune des culées; les ponts de Coblenz et de l'Erdre présentaient des articulations à la base des arcs, mais étaient pourvus de calages réglables à volonté, que les constructeurs avaient jugés utiles afin de prévenir une excessive mobilité du tablier.

Quelques années après, l'*acier* se substituait au fer dans le pont de Saint-Louis (Mississipi), dont les arches mesuraient 153 mètres et 158 m. 50. Cette substitution, sans se généraliser immédiatement, allait faire peu à peu des prosélytes.

Dans le domaine des ponts à poutres droites, un événement capital fut l'établissement d'un pont gigantesque en Angleterre, celui du Forth (1883-1890). L'ouvrage comportait deux immenses travées de 520 mètres. Il consacrait le système cantilever, déjà appliqué en France à la passerelle de Passy. Chaque pile était surmontée d'une charpente métallique en encorbellement de part et d'autre; les saillies atteignaient 200 mètres et laissaient au milieu des travées un espace de 120 mètres environ, fermé par des poutres centrales. L'aspect produisit une impression assurément grandiose, mais non exempte de gêne : si l'apparence d'une poutre droite ou d'un arc traduit visiblement le but de l'ouvrage, la silhouette du pont du Forth demeure inexplicable, tant que la pensée de l'observateur ne s'est pas reportée à la période de construction; en effet, le dessin a été subordonné à la détermination préalable des procédés de montage.

Le tour de force des Anglais n'a pas trouvé d'imitateurs. Mais les longues portées pour les ponts à poutres droites sont entrées dans la pratique courante : pont de Carol I^{er} ou de Cernavoda sur le Danube, 190 mètres; pont de Red-Rock en Californie, 201 mètres; pont de Memphis sur le Mississipi, 241 mètres; pont François-Joseph en Hongrie, 175 mètres; etc. Le système cantilever s'est répandu et quelquefois complété par l'addition de contrepoids aux abouts des petites travées de rive. Fréquemment, des poutres à semelles paraboliques ou demi-paraboliques remplacent les poutres à semelles horizontales. Pour les ponts à plusieurs travées, une tendance se manifeste vers l'indépendance de ces travées, quand la situation des lieux n'oblige pas à procéder par voie de lançage : la continuité ne diminue pas notablement le poids du métal, fatigue davantage les appuis et accentue les inégalités du travail de la matière; d'un autre côté, l'opération du lançage risque de fatiguer l'ouvrage. Les partisans des assemblages flexibles gagnent du terrain.

En 1877, M. Eiffel avait jeté sur le Douro, à Porto, un arc de

160 mètres d'ouverture. Ce chiffre fut légèrement dépassé au viaduc de Garabit, dont l'arc parabolique franchissait 165 mètres, ainsi qu'au pont Luiz I^{er}, à Porto (172 m. 50). Récemment, les ingénieurs français ont atteint 220 mètres au viaduc du Vaur; l'ouvrage est entièrement en acier et l'arc central se continue par des demi-arcs en encorbellement. Les grands ponts en arc construits à l'étranger vers la fin du siècle sont ceux de Grünstal (156 m. 50), de Levensau (163 mètres), de Münst (160 mètres), du Niagara (168 mètres), de Bonn (187 mètres), de Düsseldorf (181 mètres). Aujourd'hui, l'utilité de deux ou de trois rotules ne soulève plus guère de controverses.

Un dernier progrès, dû à l'Administration de l'Exposition universelle de 1900, a été l'introduction de l'acier moulé dans la structure des ponts en arc. C'est de ce métal qu'est fait le beau pont Alexandre III. L'ouvrage présente une ouverture de 107 m. 50 entre les articulations des naissances et un surbaissement de $1/17$; trois rotules sont disposées au sommet et à la base des arcs. Depuis longtemps en usage pour les travaux de l'artillerie et de la marine, l'acier moulé ne l'était pas encore pour les travaux de ponts; à ses mérites de légèreté et de résistance il joint de précieuses qualités décoratives.

L'Exposition de 1900 a laissé un autre ouvrage fort intéressant en acier laminé, la passerelle sur la Seine entre les ponts de l'Alma et d'Iéna, qui comprend un arc central de 75 mètres d'ouverture et deux demi-arcs latéraux de 22 m. 50 équilibrant le premier. Des bielles articulées sur l'about des arcs latéraux et sur des tirants ancrés dans le sol annulent les déplacements verticaux à chaque extrémité de la passerelle.

Certains ponts ou viaducs métalliques sont remarquables par leur grande élévation au-dessus du thalweg : tels ceux de la Cère, de Busseau d'Ahun, de Crumlin, de la Sioule, de la Sitter, du Credo, de la Bouble, de Portage, de Castellaneta, de Fribourg, de Varragas, du Kentucky River, etc. (55 à 81 mètres); tels encore, parmi les ouvrages les plus récents, le viaduc de la Tardes (92 mètres), celui de Münst (106 mètres), celui du Vaur (122 mètres), celui de Garabit (123 mètres).

Les viaducs à travées multiples reposent souvent sur des appuis en métal. Un ouvrage anglais, le viaduc de Crumlin, d'une hauteur de 64 mètres, terminé en 1853, est le premier qui ait reçu des piles de ce genre. M. Nordling, mettant à profit son expérience personnelle, a consacré aux appuis métalliques des viaducs deux savants mémoires (*Annales des ponts et chaussées*, 1864 et 1870). Pendant fort longtemps, le type classique fut celui des arbalétriers en fonte dessinant un tronc de pyramide et vigoureusement étré sillonnés. Les arbalétriers en fonte avaient le défaut d'être trop élastiques, de présenter des difficultés pour l'exécution des joints, et parfois d'éclater quand l'eau s'accumulait à l'intérieur et s'y congelait; ils ont fait place à des arbalétriers en fer ou en acier. À peine est-il besoin d'insister sur le soin avec lequel les ingénieurs doivent assurer la résistance des piles métalliques aux efforts que peuvent y développer les tempêtes, les mouvements de dilatation du tablier ou les opérations de montage.

Dès une époque reculée, divers pays ont eu des *ponts suspendus* au moyen de cordages. L'idée devait naturellement venir, de remplacer les cordages par des chaînes, puis par des barres de fer articulées, enfin par des câbles métalliques. Après s'être fait jour aux États-Unis, la conception nouvelle passa, vers 1820, en Angleterre, où Telford constitua des types de 100 à 200 mètres de portée.

Jusqu'en 1850, le système de pont suspendu fut à peu près seul employé, quand les circonstances locales comportaient l'emploi de travées ayant plus de 50 mètres ou lorsque les nécessités budgétaires exigeaient impérieusement une construction économique. Il permit notamment la suppression de nombreux bacs, n'assurant que des communications précaires et incommodes. Navier en avait donné la théorie à la suite d'une mission au delà du détroit; Jullien, alors élève-ingénieur des ponts et chaussées, s'était distingué, peu de temps après, par un savant mémoire qui complétait heureusement le travail de Navier. On vit s'élever des ouvrages tels que ceux de Fribourg en Suisse (271 mètres de portée), de la Roche-Bernard (198 mètres), de Lorient (188 mètres), de Pesth (203 mètres), de Wheeling aux États-Unis (308 mètres), de Queenstown sur le Niagara (317 mè-

tres). Mais, vers 1850, quelques accidents, dont le plus grave a été la chute du pont de Basse-Chaine à Angers, sous le passage de soldats en marche, provoquèrent une vive réaction en France et en Angleterre, précisément à l'heure où les ponts métalliques de grande ouverture entraient en scène, comme à point nommé.

Les ingénieurs américains, qui ont souvent à vaincre les difficultés d'un sol puissamment découpé et qui tiennent à faire vite et économiquement, persévérèrent dans la voie de leurs devanciers et n'hésitèrent même pas à construire des ponts suspendus pour chemins de fer (pont d'aval du Niagara, 250 mètres). Augmentant successivement les portées, ils ont atteint 322 mètres à Cincinnati, puis 386 mètres aux chutes du Niagara; dans le magnifique pont de Brooklyn jeté sur la rivière de l'Est, de 1870 à 1883, pour quatre voies charretières et deux voies de tramways, leur audace est allée jusqu'à établir une travée de 486 mètres comprise entre deux autres de 286 mètres. Ce dernier ouvrage vient d'être doublé par un nouveau pont suspendu, dont les tours, distantes de 488 mètres, s'élèvent à 102 mètres au-dessus des hautes mers. Des projets pour la traversée de l'Hudson, à New-York, prévoient une ouverture de 992 mètres.

Cet exemple n'a pas été suivi en Europe. Pourtant, grâce à l'étude des principes appliqués par les Américains, nos ingénieurs ont su réaliser de très sérieux progrès, et les ponts suspendus se sont relevés, en France, du discrédit où ils étaient tombés. On peut citer, parmi les améliorations plus ou moins récentes, l'emploi de câbles tordus, l'inclinaison de leur plan, l'adaptation de haubans ou câbles obliques reliant sur une certaine longueur les pilastres au pied des tiges verticales de suspension, les dispositifs propres à empêcher le soulèvement du tablier par les tempêtes, la rigidité croissante donnée aux garde-corps et aux câbles eux-mêmes, les précautions prises en vue des mouvements de dilatation, le soin extrême mis à faciliter la visite des amarres ainsi que celle des autres pièces et leur remplacement ou réparation sans interrompre la circulation, etc.

Aux ponts suspendus se rattachent les *transbordeurs* imaginés par M. Arnodin pour la traversée du lit maritime des rivières. Un pont

suspendu très robuste franchit la passe à grande hauteur, sans entraver la circulation des bateaux avec leur mâture. Sous le tablier roule un chariot mû par la vapeur ou l'électricité et portant, au moyen de tiges entre-croisées, le transbordeur qui va d'une rive à l'autre en se tenant au niveau des quais.

Ce système élégant et économique avait déjà reçu quatre applications avant la fin du siècle, à Portugaleta près Bilbao (160 mètres), à Bizerte (109 mètres), à Rouen (143 mètres) et à Martrou sur la Charente (140 mètres). Il paraît devoir se répandre.

Les transbordeurs constituent la transition entre les ponts fixes et les *ponts mobiles*. Ces derniers ouvrages se répartissent en diverses catégories : ponts levants (ponts-levis, ponts à soulèvement, ponts à bascule); ponts tournants (ponts tournants équilibrés, ponts-grues); ponts roulants; ponts flottants. Aujourd'hui, leur ossature se fait en fer et en acier.

Connus depuis longtemps et limités aux faibles ouvertures, les *ponts-levis* n'appellent aucune indication spéciale. Les recherches du siècle ont surtout porté sur le moyen de proportionner constamment l'action du contrepoids à celle du tablier.

De même que les ponts-levis, les *ponts à soulèvement* sont équilibrés par des contrepoids. L'effet de ces contrepoids peut être modifié, le cas échéant, à l'aide de bâches qu'on remplit d'eau et qu'on vide alternativement. Suivant la portée et les ressources locales, la manœuvre est effectuée à bras ou mécaniquement; l'eau sous pression convient bien à cet usage. Un spécimen remarquable est celui de Chicago, où la portée atteint 40 mètres et la levée 45 mètres.

Pour éviter la gêne causée par les portiques des ponts-levis, les ingénieurs ont imaginé des *ponts à bascule*, dont le tablier se prolonge en une culasse formant contrepoids et logée sous la chaussée. À peu près abandonné en France, ce système d'ouvrages mobiles continue à être appliqué dans plusieurs pays étrangers, avec de longues portées (maximum, 61 mètres); dans ce cas, le pont comporte deux volées. Parfois, au lieu d'une bascule complète, le tablier ne reçoit qu'une inclinaison suffisant au passage des bateaux. Certains ponts tournants

sont en même temps à bascule; ils s'ouvrent pour les navires et basculent simplement pour les gabares, allèges, etc. La puissance mécanique nécessaire est fournie par l'eau sous pression, l'air comprimé ou l'électricité.

Les *ponts tournants*, très anciennement employés, ont pris des proportions croissantes au fur et à mesure que s'élargissaient les pertuis des ports maritimes. Ils peuvent être à une ou deux volées : la double volée, qui facilitait la construction avant le remplacement du bois par le métal, a l'inconvénient de créer des porte à faux et de compliquer la manœuvre; actuellement, les préférences vont à la simple volée. Souvent, l'ouvrage tourne sur un bajoyer central et découvre deux pertuis qui ont en général la même ouverture. Le tablier est porté, tantôt par une couronne de galets, tantôt par un pivot et des galets ou roulettes, tantôt exclusivement par le pivot; de ces trois systèmes, le premier, avantageux au point de vue de la stabilité, présente en revanche des défauts tenant à l'impossibilité pratique d'une répartition uniforme de la charge et à la difficulté du changement des galets; le second système prévaut maintenant; quant au troisième, il compte des partisans, spécialement en Hollande. Parmi les ponts à pivot et roulettes, les uns, en particulier ceux qui ouvrent deux pertuis voisins, n'ont pas de basculement; les autres, au contraire, basculent soit par le soulèvement du pivot, soit par l'abaissement de la culasse. Les grands ponts tournants sont fréquemment manœuvrés au moyen de l'eau sous pression, et le pivot est alors hydraulique ou ordinaire; dans le cas du pivot hydraulique, si l'ouvrage ne comporte qu'un soulèvement droit, des organes spéciaux doivent s'opposer au déversement de la presse unique pendant la rotation. Il faut limiter les mouvements par des butoirs; les tampons hydrauliques d'inertie donnent, pour cet objet, d'excellents résultats. Un des ponts tournants à deux volées les plus célèbres est celui de la Penfeld, à Brest, qui ouvre une passe de 106 mètres et dont les culées sont distantes de 174 mètres; l'ouverture des ponts à une volée atteint 50 mètres, comme aux pertuis d'Arcenc à Marseille et du canal de Kiel, ou même 50 m. 50, comme au pertuis de Missiessy à Toulon; les pertuis doubles des ponts à bajoyer central ont couramment 30 à 35 mètres chacun, et l'Exposition de 1900 montrait les dessins d'un passage pour chemin de fer

sur le canal de Chicago, dont la longueur totale s'élevait, par suite du biais, à 145 mètres.

Une autre catégorie de ponts mobiles, moins employée que la précédente, mais néanmoins assez répandue, est celle des *ponts roulants*, susceptibles de se déplacer sur des galets perpendiculairement à la passe. La largeur des pertuis que découvrent ces ouvrages peut, sans grande difficulté, atteindre 30 mètres, et la longueur de la culasse représente en moyenne 60 p. 100 de la portée utile. Quand le pont doit livrer passage aux voitures, il faut lui ménager des encuvements dans les deux bajoyers; la manœuvre d'ouverture exige donc un soulèvement simple ou à bascule; le basculement offre l'avantage de ne jamais faire porter par la presse qu'une partie du poids de l'ouvrage. Ici encore, l'eau sous pression constitue un bon agent moteur. A la catégorie des ponts roulants se rattache la passerelle reliant Saint-Malo et Saint-Servan, vers l'entrée de l'avant-port, au travers d'une passe de 101 mètres.

Les *ponts flottants*, ponts de bateaux ou pontons, sont assez rares aujourd'hui, du moins à titre d'ouvrages définitifs. Entre autre ponts de bateaux, ceux du Rhin et spécialement celui de Kehl avaient une véritable notoriété. Les États-Unis ont des pontons d'une longueur de 125 mètres pour chemins de fer. Dans les ports maritimes, les pontons flottants ne s'accrochent que des faibles marées.

2. Routes et chemins vicinaux. — Au début du XIX^e siècle, les grandes routes étaient devenues à peu près impraticables et n'avaient plus guère que des chaussées entièrement ruinées, par suite de l'insuffisance des ressources affectées à leur entretien. Le premier Empire s'attacha à les rétablir. Napoléon I^{er} reprit d'ailleurs la tradition romaine. Les pays où il avait porté ses armes victorieuses virent le vainqueur d'hier livrer à la nature un combat opiniâtre, pour percer les barrières naturelles et y aménager des communications régulières. Devant sa volonté toute-puissante, les Alpes durent s'ouvrir aux routes du Mont-Cenis, du Simplon, de la Corniche, du Mont-Genève, de Cézannes à Fenestrelle, du Lautaret : il y eut là une page saisissante de l'épopée impériale.

La Restauration poursuivit l'œuvre du premier Empire. Parmi les travaux de l'époque, on cite encore comme un modèle la rectification de la route nationale reliant le faite séparatif des bassins de l'Océan et de la Méditerranée à la ville de Tarare.

Après l'expédition de Grèce et la prise d'Alger, l'ère des grandes guerres semblait terminée, et l'activité publique se tournait vers le développement de l'agriculture, de l'industrie et du commerce. Une place importante dans les préoccupations des pouvoirs publics devait être réservée au perfectionnement des voies de communication. Le réseau des routes nationales et celui des routes départementales reçurent de larges extensions.

Sous le second Empire, le comblement des lacunes et la rectification des tracés défectueux furent amplement dotés.

Le passage des armées et les faits de guerre, pendant la campagne de 1870-1871, avaient mis beaucoup de nos routes dans un état lamentable. Il fallut d'abord relever les ponts détruits et pourvoir à la reconstitution des chaussées. Puis, en 1878, sur l'ordre de M. de Freycinet, Ministre des travaux publics, le Conseil général des ponts et chaussées dressa un inventaire méthodique, avec classement, par ordre d'urgence, des corrections et des compléments qu'appelaient les routes nationales. La réalisation de ce sage programme a été poursuivie depuis lors; ses prévisions ont subi quelques changements motivés par des circonstances nouvelles.

En même temps que se resserraient les mailles des routes nationales ou départementales, des principes plus rationnels de construction et d'entretien se dégagèrent peu à peu de la théorie et de la pratique. Dans les premières années du siècle, la méthode de Trésaguet, pour l'établissement des chaussées d'empierrement avec fondations, était encore la loi universelle. Vers 1820, une méthode nouvelle, due à Mac-Adam, commença à se répandre en Angleterre et, de là, dans toute l'Europe : la principale réforme du célèbre ingénieur fut la condamnation du système des fondations. Polonceau réalisa en 1834 un progrès notable, par l'incorporation artificielle de matières d'aggrégation et par l'application du cylindrage, dont de Cessart avait eu l'idée au siècle précédent. De savants ingénieurs, entre autres

Favier (1841), M. L. Durand-Claye (1871) et M. Lechalas (1879), formulèrent des règles pour la comparaison et le choix des tracés. Au procédé d'entretien par emplois partiels de matériaux s'ajouta celui des rechargements généraux cylindrés, inauguré par Graeff dans le département du Bas-Rhin.

L'outillage primitif subit des transformations profondes. Outre les rouleaux compresseurs à traction animale, puis à vapeur, on vit naître les balayeuses mécaniques, les tonneaux d'arrosage, les charrues à neige. Des machines furent créées pour le cassage des pierres au moyen de deux cylindres à dents ou de deux puissantes mâchoires, l'une fixe, l'autre mobile.

De 1871 à 1901, l'État a consacré environ 132 millions de francs aux grosses réparations ou aux travaux neufs de nos routes nationales et plus de 780 millions à leur entretien.

Le rôle des grandes routes s'est modifié depuis la construction des chemins de fer. Elles ne servent plus comme autrefois aux transports à toute distance, mais constituent plutôt des affluents du réseau ferré, apportant aux gares le trafic des régions voisines et distribuant les voyageurs ou les marchandises amenés par la locomotive. Leur circulation s'est localisée. Cependant l'automobilisme tend aujourd'hui à faire revivre dans quelque mesure les longs parcours. Aussi bien, si la fonction des routes a changé de caractère, elle n'en garde pas moins une extrême importance, qu'attestent les recensements officiels. D'après ces recensements, le nombre quotidien des colliers sur les routes nationales était de 244.2 en 1851-1852, de 246.4 en 1856-1857, de 237.4 en 1863-64, de 239.9 en 1869, de 206.7 en 1876, de 219.8 en 1882, de 240.5 en 1888, de 240 en 1894 et de 251.4 en 1903; ainsi, après avoir fléchi de 1856 à 1876, il s'est relevé pour reprendre à peu près la même valeur qu'au commencement de la seconde moitié du siècle.

Jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, les chemins vicinaux furent entièrement laissés aux soins des administrations locales, qui se montrèrent en général peu soucieuses de remplir leur mission. Malgré sa forte organisation, le premier Empire ne sut pas vaincre l'indifférence funeste

dont souffraient ces voies de transport, pourtant si utiles au pays. Un acte législatif du 28 juillet 1824 édicta enfin, non sans timidité, des règles d'exécution et d'entretien. Mais les chemins vicinaux n'eurent leur véritable charte qu'avec la loi du 21 mai 1836.

Cette loi soumettait la gestion de la voirie vicinale à des règles nettement codifiées et lui affectait des ressources régulières. Elle distinguait les chemins de grande communication des chemins ordinaires et contenait en germe l'institution d'une catégorie intermédiaire, dite *d'intérêt commun*, qui devait être définitivement consacrée en 1861. Un vaste réseau de chemins de grande communication s'étendit bientôt sur presque tous les départements; les chemins d'intérêt commun se développèrent moins rapidement; quant aux chemins vicinaux ordinaires, leur situation resta mauvaise. Pour donner une impulsion plus vive à l'activité locale, il fallut que les pouvoirs publics stimulassent les intéressés par l'allocation de subsides sur les fonds du Trésor. L'acte décisif à cet égard fut la loi du 11 juillet 1868 : des dotations respectives de 100 millions et de 15 millions étaient attribuées aux chemins vicinaux ordinaires et aux chemins d'intérêt commun; en outre, le législateur instituait une caisse chargée de consentir des prêts en faveur des communes et même des départements, jusqu'à concurrence de 200 millions. Un document officiel de l'époque cherchait à frapper les esprits par le calcul suivant : « Si on a un million à dépenser en voies « de locomotion, on pourra l'employer soit à exécuter 5 kilomètres de « chemins de fer d'intérêt local, qui donneront satisfaction à 12,000 per- « sonnes, soit à créer 250 kilomètres de chemins vicinaux ordinaires, « qui desserviront plus de 80,000 personnes ».

Des lois ultérieures ont prorogé le terme de la période primitivement assignée aux avances, en même temps que la dotation de la Caisse était élevée à 536 millions et que des subsides nouveaux s'ajoutaient à ceux de 1868. Aujourd'hui, la Caisse est liquidée et les subventions font l'objet de crédits annuels au budget du Ministère de l'intérieur. Le montant total des prêts aux départements et aux communes a été de 535,315,700 francs; d'autre part, les subsides accordés par l'État, de 1846 à 1900, ont atteint 131,500,000 francs environ.

En 1900, la longueur des routes nationales (38,065 kilomètres) approchait de celle du méridien terrestre.

Les routes départementales et les chemins vicinaux en état régulier d'entretien mesuraient plus de 527,000 kilomètres; unies bout à bout, ces voies eussent fait treize fois le tour du globe; l'accroissement proportionnel de leur longueur sous la troisième République dépassait 40 p. 100.

3. Navigation intérieure. — Peu de questions économiques ont été aussi souvent et aussi ardemment discutées que celle des travaux de navigation intérieure depuis la naissance des chemins de fer. L'importance et la multiplicité des intérêts en cause, leur opposition fréquente, l'ignorance ou la connaissance imparfaite des conditions du problème, la tendance de beaucoup d'esprits à une généralisation excessive des solutions, tout devait contribuer à obscurcir le débat.

Les uns ne voulaient voir dans la navigation fluviale qu'un moyen suranné de transport. Dès lors que la locomotive était venue fournir à l'agriculture, à l'industrie et au commerce un instrument de circulation d'une rapidité, d'une puissance et d'une souplesse merveilleuses, pourquoi ne pas tirer de cet instrument le maximum d'utilité, pourquoi lui susciter des concurrences, pourquoi s'insurger contre la loi inéluctable du progrès, pourquoi engager des dépenses frustratoires en doublant des voies perfectionnées par des voies d'un autre âge? La fortune nationale en serait doublement atteinte, car le pays aurait d'abord à supporter des frais inutiles de premier établissement, puis à subir sur le chemin de fer des taxes supérieures à celles qu'eût permises la concentration du trafic. C'est pour la défense de cette doctrine que furent livrés au canal de la Marne au Rhin et au canal latéral à la Garonne des assauts mémorables, dont l'audace menaçait un instant la vie des nouveau-nés.

Comme toujours, les violences de l'attaque provoquaient les exagérations de la riposte. La navigation avait des champions intransigeants et irréductibles; ses défenseurs s'attachaient en général au seul prix apparent du fret, ne tenaient pas compte de la différence entre le régime des chemins de fer grevés des charges du capital de construction et

celui des voies fluviales mises gratuitement ou moyennant un péage modique à la disposition de la batellerie, entendaient restreindre le rôle des voies ferrées aux voyageurs et aux marchandises présentant une grande valeur spécifique ou devant être livrées dans un court délai.

À côté des opinions extrêmes se manifestaient heureusement des opinions plus sages et plus pondérées, qui ont fini par prévaloir.

Les voies ferrées ont pour elles la vitesse, la régularité, l'aptitude au transport par petites masses, la fixité relative des prix. En revanche, les voies navigables entraînent ordinairement des dépenses moindres de construction et d'entretien; elles sont librement ouvertes à toutes les entreprises qui veulent y organiser un service; à l'inverse des chemins de fer, elles peuvent recevoir ou livrer des marchandises sur un point quelconque de leur parcours et constituent de véritables ports continus; leur matériel de transport est peu coûteux, n'a qu'un faible poids mort, sert le cas échéant de magasin; pour une même charge, l'effort de traction reste très inférieur à celui qu'exigent les wagons.

Mais, si importantes que soient ces considérations d'ensemble, chaque décision d'espèce n'en est pas moins subordonnée à une étude attentive des circonstances spéciales.

Quand on se trouve en présence d'une rivière susceptible d'être rendue navigable sans améliorations trop onéreuses, aucune hésitation ne saurait subsister; l'homme serait coupable, s'il négligeait d'utiliser un élément de richesse que la nature a mis sous sa main.

Le doute n'est pas davantage possible, lorsque la région offre d'abondantes ressources minérales, paraît capable d'un puissant essor industriel et se prête matériellement à la création d'une voie fluviale. Rien ne s'oppose alors à la coexistence des deux moyens de transport; cette coexistence se justifie au contraire pleinement. Entre la voie navigable et la voie ferrée a lieu un partage naturel d'attributions, donnant à la première les marchandises pondéreuses et à la seconde les marchandises de valeur. Loin de se nuire, les deux instruments de transport se complètent, s'apportent un mutuel appui, progressent solidairement et, en définitive, bénéficient tous deux d'une juxtaposi-

tion féconde, sans laquelle le sol aurait gardé ses trésors. La banlieue nancéenne fournit un témoignage frappant des bienfaits qu'engendre ainsi le concours d'un chemin de fer et d'un canal; ce ne sont qu'exploitations de mines, forges, hauts fourneaux, salines, carrières, se succédant presque sans interruption; à elle seule, la voie ferrée eût difficilement produit un tel épanouissement d'activité.

Dans les autres cas, la prudence et la circonspection s'imposent. Il faut scruter minutieusement la situation, tenir un juste compte de l'intérêt et de l'amortissement du capital qui serait éventuellement consacré à l'exécution de la voie navigable, ne pas instituer de concurrence abusive contre un chemin de fer dont la capacité de trafic suffirait aux besoins d'un avenir assez lointain, éviter la dépense d'un second outillage de transport si le premier est en mesure de satisfaire largement aux nécessités de la circulation.

La détermination des pouvoirs publics dépend, d'ailleurs, souvent du régime auquel sont soumises les voies de transport. Elle peut différer selon que ce régime est celui de la concession; de l'affermage ou de la régie et suivant qu'il y a ou non unité de condition pour les deux catégories de voies. En cas de concession ou d'affermage, elle est susceptible de varier avec le degré d'autorité du Gouvernement sur les tarifs, avec la nature des liens financiers établis entre l'État et l'exploitant.

Un exemple marquera bien l'influence exercée par ces circonstances de fait. Vis-à-vis des chemins de fer concédés, les canaux dont l'usage est gratuit ou seulement assujéti à des taxes modiques jouent le rôle d'un modérateur et d'un stimulant, obligent le concessionnaire à ne pas exagérer ses tarifs et à perfectionner ses services. Dès lors, dans les pays où le système de la concession a prévalu pour les voies ferrées et celui de la gratuité de circulation pour les voies navigables, telle éventualité pourra surgir, qui conduira les pouvoirs publics à décider l'établissement d'un canal, alors que l'État, maître de la tarification du chemin de fer et rémunéré indirectement de ses sacrifices sur l'exploitation par l'accroissement de la prospérité nationale, n'aurait pas créé le nouvel outil de transport.

Avant l'apparition de la locomotive, la France possédait un ensemble assez imposant de voies navigables. Elle s'en est quelque peu désintéressée, du jour où a été entrepris son réseau de voies ferrées. Le Gouvernement consacrait au nouveau mode de transport la majeure partie des ressources disponibles et ne voulait lui susciter aucune concurrence susceptible de grever la garantie d'intérêt; de leur côté, les compagnies concessionnaires de chemins de fer ne se faisaient pas faute de provoquer un courant d'opinion défavorable à l'extension des transports par eau; le public lui-même cédait sans trop de résistance à ce mouvement et considérait assez volontiers la navigation comme devant disparaître devant les prodiges accomplis par les voies de fer. Il fallut toute l'énergie de certains ingénieurs, comme M. Frécot, pour répandre des idées plus saines, pour combattre et vaincre les préjugés, pour rectifier des théories manifestement erronées dans leur exagération; il fallut aussi la puissante initiative et la haute autorité de M. de Freycinet, Ministre des travaux publics, pour renouer la chaîne interrompue.

Le tableau suivant indique les dépenses faites en travaux extraordinaires et en travaux ordinaires de navigation intérieure sous les divers gouvernements qui se sont succédé depuis 1814 :

PÉRIODES.	TRAVAUX		ENSEMBLE.
	EXTRAORDINAIRES.	ORDINAIRES.	
	francs.	francs.	francs.
1814-1830.....	149,179,000	33,608,000	182,787,000
1831-1847.....	341,246,000	141,006,000	482,252,000
1848-1851.....	37,792,000	44,757,000	82,549,000
1852-1870.....	238,792,000	212,698,000	451,490,000
1871-1900.....	773,072,000	327,532,000	1,100,604,000
TOTAUX.....	1,540,081,000	759,601,000	2,299,682,000

Voici, d'autre part, récapitulées dans un second tableau la progression de la longueur du réseau effectivement utilisé et celle du

tonnage ramené soit au parcours d'un kilomètre, soit à la longueur totale :

ANNÉES.	LONGUEURS.			TONNAGE.	
	RIVIÈRES.	CANAUX.	ENSEMBLE.	RAMENÉ AU PARCOURS de 1 kilomètre.	RAMENÉ À LA DISTANCE entière.
	kilomètres.	kilomètres.	kilomètres.	tonnes.	tonnes.
1847.....	6,700	3,750	10,450	1,813,000,000	173,000
1850.....	6,700	3,880	10,580	1,666,000,000	157,000
1860.....	6,700	4,400	11,100	1,901,000,000	171,000
1870.....	6,700	4,560	11,260	1,448,000,000	129,000
1871.....	6,590	4,160	10,750	1,558,000,000	145,000
1880.....	6,590	4,350	10,940	2,007,000,000	183,000
1885.....	7,720	4,660	12,380	2,453,000,000	198,000
1890.....	7,560	4,810	12,370	3,216,000,000	260,000
1895.....	7,500	4,780	12,280	3,766,000,000	307,000
1900.....	7,300	4,850	12,150	4,675,000,000	385,000

Aussitôt après les événements de 1870-1871, un des premiers soins de la troisième République a été de rétablir, par la construction du canal de l'Est, les communications fluviales qu'interceptait la nouvelle frontière. La Saône, le Rhône, la Seine, la basse Loire, la Garonne maritime et la Gironde supérieure ont reçu de très importantes améliorations; pour la Seine, en particulier, le but principal de ces améliorations était de réaliser un mouillage de 3 m. 20 entre Paris et Rouen. Aux canaux déjà existants se sont ajoutés ceux de la Marne à la Saône, de l'Oise à l'Aisne, de Montbéliard à la Haute-Saône. Mais l'œuvre capitale a consisté dans l'unification des lignes principales du réseau, conformément à la loi du 5 avril 1879. Il s'agissait de fusionner des voies ou des tronçons créés à la demande d'intérêts locaux, de les aménager en vue d'un gabarit uniforme (mouillage de 2 mètres, écluses d'une longueur de 38 m. 50 et d'une largeur de 5 m. 20, hauteur libre de 3 m. 70 entre le plan d'eau et l'intrados des ponts fixes), d'en faire de grandes artères intimement unies, pouvant recevoir presque partout les bateaux de 300 tonnes, mettant Paris en relations régulières avec les ports de la Manche et de la Méditerranée, ainsi qu'avec les réseaux des pays frontières au Nord et à l'Est. Cette opération de mise en valeur, sagement conçue et habile-

ment exécutée au prix de sacrifices relativement faibles, est, sans aucun doute, l'une des plus profitables à laquelle l'activité française se soit jamais consacrée. Elle n'a point tardé à porter ses fruits, comme l'atteste le tableau précédent. De 1847 à 1870, le trafic marquait plutôt une tendance à décroître qu'à augmenter; de 1871 à 1900, le tonnage ramené au parcours d'un kilomètre s'est accru de 200 p. 100 et le tonnage ramené à la distance entière, de 165 p. 100; la plus large part de ce progrès appartient d'ailleurs à la dernière période décennale.

Le Parlement vient de ratifier un programme de travaux d'amélioration et de travaux neufs, qui agrandira encore le domaine de la navigation intérieure et pour l'exécution duquel les intéressés apporteront un concours financier très élevé, sauf à s'en rémunérer au moyen de péages.

À l'étranger, le mouvement en faveur de la navigation fluviale n'est pas moins vif.

L'Allemagne n'avait, avant 1866, que des canaux peu nombreux et imparfaits; ses fleuves laissaient à désirer. Elle a commencé par améliorer les voies naturelles, en les régularisant, en les approfondissant, en y échelonnant des barrages mobiles, en les appropriant à la circulation des bateaux de 300 à 400 tonnes. Des travaux considérables ont été exécutés aux embouchures en forme de delta dans la Baltique et aux embouchures en entonnoir dans la mer du Nord. L'œuvre de l'Allemagne s'est poursuivie par le creusement de magnifiques canaux : le canal de Kiel, qui unit la mer du Nord à la Baltique, mesure 94 kilomètres de longueur, a une profondeur de 9 mètres, présente une écluse double à chacune de ses extrémités et livre passage aux plus grands navires de mer; le canal de Dortmund à l'Ems, reliant les centres industriels de la Westphalie à la mer du Nord, offrant une profondeur de 2 m. 50 et accessible à des bateaux de 65 mètres de longueur sur 8 m. 20 de largeur; le canal de l'Elbe à la Trave, qui met Lubeck en communication directe avec Hambourg, offre un mouillage minimum de 2 mètres pouvant être porté à 2 m. 50 et reçoit dans ses écluses, soit deux bateaux de 65 mètres sur 8 mètres

avec leur remorqueur, soit un grand bateau de 78 mètres sur 11 m. 50. En outre, l'Oder supérieur a été canalisé dans l'intérêt du transport des houilles de la haute Silésie. Vers la fin du siècle, l'Allemagne se préparait à entreprendre l'exécution d'un vaste plan nouveau, dans lequel le canal du Rhin à l'Elbe occupait la place dominante : cette voie magistrale devait avoir un développement de 466 kilomètres, emprunter une section du canal de Dortmund à l'Ems, ne comporter que six écluses entre Munster et l'Elbe, parcourir 210 kilomètres en un bief unique.

En vingt ans, de 1875 à 1895, le tonnage des voies navigables ramené au parcours d'un kilomètre est passé de 2,754,000,000 tonnes à 7,263,000,000 tonnes et le tonnage ramené à la distance entière de 306,000 tonnes à 807,000 tonnes. La progression a continué ; car, d'après les notices présentées à l'Exposition de 1900, le nombre des tonnes kilométriques pendant l'année 1898 aurait atteint 10,700,000,000 tonnes, soit le tiers du trafic des chemins de fer.

Divers ports fluviaux sont remarquables par l'ampleur de leurs installations, la puissance de leur outillage et l'intensité de leur trafic : Ruhrort-Duisbourg, Hambourg, Berlin, Manheim, Magdebourg, Stettin, Breslau, etc. Les statistiques de 1875 et de 1895 accusent respectivement 2,935,000 tonnes et 7,416,000 tonnes pour Ruhrort-Duisbourg, 3,239,000 tonnes et 5,134,000 tonnes pour Berlin, 799,000 tonnes et 3,580,000 tonnes pour Manheim, etc.

L'*Autriche* possède 6,700 kilomètres de voies navigables, fleuves ou rivières, dont 3,862 flottables en trains et 2,838 fréquentés par la batellerie. Elle a exécuté, pendant la seconde moitié du siècle, des travaux très difficiles et coûteux sur le Danube, le Rhin, l'Adige, la Vistule, l'Elbe et la Moldau : l'une des plus belles opérations a été l'ouverture pour le Danube, à Vienne, d'un nouveau lit offrant une profondeur de 3 m. 20 au-dessous de l'étiage ; la régularisation de l'Elbe et de la Moldau entre Prague et Aussig, qui se poursuivait en 1900, nécessitait la construction de barrages mobiles avec de vastes écluses et devait assurer le passage des plus grands bateaux de l'Elbe (60 à 70 mètres de longueur, 10 à 11 mètres de largeur, 1 m. 70 à 1 m. 80 de tirant d'eau, 600 à 700 tonnes). Des projets sont à

l'étude, depuis plusieurs années, en vue de la jonction du Danube à l'Elbe par un canal qui aurait son origine à Vienne.

En *Belgique*, il existe 2,196 kilomètres de voies navigables : 1,231 kilomètres de rivières; 735 kilomètres de canaux ayant un mouillage de 2 mètres au moins et des écluses de 40 m. 80 de longueur sur 5 m. 20 de largeur; 230 kilomètres de canaux ouverts seulement à la petite navigation. Vers 1900, le tonnage ramené à la distance entière approchait de 300,000 tonnes. Un canal maritime de Bruges à la mer était en construction; celui de Bruxelles recevait des améliorations importantes.

Aux *États-Unis*, le développement des chemins de fer n'a nullement préjudicié à celui des voies navigables. L'une des grandes artères est le Mississippi, qui parcourt 4,100 kilomètres entre le lac Itasca et le golfe du Mexique; plusieurs réservoirs pouvant contenir 2 milliards et demi de mètres cubes en régularisent le débit; la navigation à vapeur s'y pratique sur 3,200 kilomètres. De nombreux affluents sillonnent le bassin du Mississippi, et leurs sections ouvertes à la batellerie représentent 24,000 kilomètres environ. Le bassin des grands lacs était, dès 1825, relié par le canal Erié à la rivière Hudson et à New-York; des travaux considérables ont été entrepris pour porter à 67 mètres la longueur des écluses et à 2 mètres au minimum le mouillage de ce canal, ainsi que des canaux Oswego et Champlain.

Les voies navigables du *Canada* sont le Saint-Laurent avec les grands lacs, la rivière Richelieu, le canal Chambly, une ligne de Montréal à Kingston par l'Ottawa, etc. Elles desservent une circulation active.

Bien qu'intéressant surtout la défense des villes et des plaines basses contre les inondations, l'œuvre grandiose de régularisation du Danube en *Hongrie* n'en a pas moins été éminemment utile à la navigation, notamment au passage des Portes-de-Fer. Outre le Danube, il convient de citer la Tisza, la Save, la Drave, le canal François reliant la Tisza au Danube, le canal François-Joseph. Dans l'ensemble, le réseau hongrois comprenait, à la fin du siècle, 2,745 kilomètres de fleuves ou rivières praticables pour les bateaux à vapeur, 4,462 kilomètres de cours d'eau propres au flottage et 353 kilomètres de canaux; le nombre de tonnes-kilomètres atteignait 1,325,000,000.

On sait la légitime réputation acquise aux ingénieurs des *Pays-Bas* pour tout ce qui touche à l'aménagement des eaux. Parmi les travaux du siècle, il y a lieu de signaler particulièrement l'amélioration du Rhin, de la Meuse, du Wahal, du Leck, ainsi que l'ouverture des canaux d'Amsterdam et de Rotterdam à la mer. Le grand courant de circulation qui, de la mer du Nord, s'étend par le Rhin jusqu'à Manheim, emprunte sur le territoire hollandais le Scheur, la Nouvelle-Meuse, le Noord, la Merwede, le Wahal et une petite section du Rhin; cette ligne, très défectueuse jusqu'en 1849, a été transformée et offre un mouillage minimum de 3 mètres; il en est résulté un énorme accroissement du trafic de Rotterdam, où le seul mouvement de la navigation rhénane a presque triplé en dix ans (2,376,000 tonnes pendant l'année 1889 et 6,867,000 tonnes pendant l'année 1899).

Le formidable réseau des voies navigables et flottables de *Russie* présente, non compris la Finlande, un développement de 171,000 kilomètres environ : 82,825 kilomètres dans la Russie d'Europe et 88,292 kilomètres dans la Russie d'Asie. Dans ces totaux, les voies artificielles, canaux ou canalisations, ne figurent que pour 2,069 kilomètres. Les principaux fleuves sont le Volga, le Don, le Dnèper, la Vistule, le Némen, la Dwina, la Néva, l'Obi, l'Énèssèï, la Léna, l'Amour. En Europe, des jonctions ont été établies entre les principaux bassins fluviaux, qui se trouvent ainsi répartis entre deux vastes groupes. Le tonnage absolu, pour la Russie européenne, s'est élevé de 10,200,000 tonnes en 1871 à 27,900,000 tonnes en 1897; à ce dernier chiffre correspondait un mouvement de 23 milliards de tonnes-kilomètres, peu différent de celui des voies ferrées (24 milliards). Des travaux considérables de régularisation se poursuivaient, à la fin du siècle, notamment sur le Volga, la Vistule, le Dnèper. La Finlande possède quelques canaux, tels que le canal de Saïma.

Ces quelques exemples, pris dans les seuls pays qui aient organisé en 1900 une exposition relative à leurs voies navigables, suffisent à montrer l'étendue de la fonction économique remplie par la navigation intérieure à la fin du xix^e siècle. Partout, les gouvernements et les peuples ont compris que les chemins de fer n'excluaient nullement l'utilisation des rivières ou des canaux et qu'un concours méthodique-

ment ordonné des deux modes de transport était indispensable à l'essor de la prospérité générale.

Un procédé classique d'amélioration des rivières, quand elles débitent assez en étiage pour porter des bateaux de fort tonnage, consiste à laisser le courant libre, mais à le régulariser et à assurer, au moyen des eaux elles-mêmes, la position, la largeur et la profondeur du chenal. Les travaux de la Garonne et du Rhône peuvent être cités comme des modèles. D'après les principes qui y ont été appliqués, un lit majeur, compris entre deux digues insubmersibles et capable de renfermer les plus grandes crues, contient un lit mineur à largeur croissante de l'amont vers l'aval, limité par des épis plongeurs ou par des digues basses longitudinales et tracé avec une suite d'inflexions à courbure progressivement variable. Souvent, des bras secondaires doivent être barrés, du moins pour les basses eaux. Les digues sont formées d'enrochements, de gravier, de bois, de fascinages, etc.; leur emplacement et leur relief au-dessus du fond dépendent des circonstances et se déterminent empiriquement. Un tel aménagement, bien approprié à chaque cas particulier et combiné avec des dragages ou, au besoin, avec des dérochements, a produit d'excellents résultats; les ingénieurs néerlandais, juges émérites en la matière, y ont eu recours sur le Rhin, la Meuse et d'autres fleuves.

La correction aux embouchures maritimes présente de grosses difficultés. Si la mer est sans marées, un delta, sorte de cône de déjection, se forme, s'étend et éparpille ces embouchures; l'idée vient naturellement de concentrer les eaux dans un bras unique; mais l'opération n'a en général qu'un succès éphémère, et, à moins qu'il n'existe un courant littoral pouvant dissiper les apports fluviaux, la vraie solution réside ordinairement dans la substitution d'une voie artificielle au cours d'eau naturel. Si la mer est à marées, le régime, fréquemment compliqué par des dépôts marins, relève surtout de l'action du flot et du jusant; lorsque la marée apporte plus d'alluvions qu'elle ne peut en remporter, une voie artificielle s'impose; dans l'éventualité inverse, il y a lieu d'emmagasiner au flot le plus grand volume possible pour le restituer au jusant dans un chenal resserré et convenable-

ment disposé. Le Nil, le Rhône, le Danube, le Mississippi, la Clyde, la Seine, la Loire, la Gironde, etc., fournissent à cet égard des enseignements précieux. Une opération particulièrement intéressante a été l'endiguement de la Seine maritime en aval de Rouen et la création d'un canal de Tancarville au Havre : les accès du port de Rouen en ont largement bénéficié et de vastes atterrissements, constitués en arrière des digues, se sont adjoints aux propriétés riveraines.

Tandis que divers pays étrangers concentraient leurs efforts sur la régularisation des rivières à courant libre, la France abordait, avec hésitation d'abord, puis, le succès venu, avec hardiesse, une solution profondément différente, ne convenant d'ailleurs qu'aux cours d'eau à pente modérée. Cette solution consistait à échelonner une succession de barrages et à substituer ainsi au cours de déclivité uniforme des biefs étagés où le mouillage ne dépendrait plus que de la hauteur du barrage d'aval. Très simple, la conception des ingénieurs français ne fut pas sans présenter quelques difficultés de réalisation : il fallait trouver des types de barrages mobiles susceptibles de proportionner le débouché au débit incessamment variable, et même de s'effacer complètement pour laisser le champ libre aux grandes crues et aux débâcles. Poirée inventa, vers 1834, un premier type demeuré célèbre et éminemment pratique, celui du barrage à fermettes et aiguilles; appliqués primitivement à de faibles chutes, les barrages à fermettes étendirent peu à peu leur domaine et fournirent des chutes atteignant 3 m. 27 comme à Suresnes; mais, en même temps, ils perdaient leur rusticité première, exigeaient des appareils mécaniques de manœuvre et appelaient le remplacement des aiguilles par d'autres organes de fermeture, tels que des vannes ou des rideaux articulés (sortes de stores fort ingénieux imaginés par Caméré). D'autres modèles suivirent, notamment : le barrage à hausses de Chanoine (1857), heureusement amélioré par M. Pasqueau (1879); le barrage à tambours de Louiche-Desfontaines, actionné par la chute elle-même (1857); le barrage à rideaux prenant leur point d'appui sur des parties mobiles suspendues à une poutre supérieure (1880). Ce dernier type, particulièrement robuste, a le double mérite de ne laisser aucune pièce dans le lit du fleuve, lors des crues ou des débâcles, et de se prêter à des

chutes considérables comme celle de Poses (4 m. 14); il est dû à Caméré, qui, tout en s'inspirant d'idées émises antérieurement par M. Taverrier, ingénieur en chef du Rhône, a été cependant un véritable créateur. Les systèmes de barrages mobiles inventés par nos ingénieurs ont reçu de nombreuses applications à l'étranger.

Aujourd'hui, les barrages sont généralement franchis au moyen d'écluses à sas, qui peuvent être établies soit en rivière, soit sur une dérivation. Quand une dérivation est longue, on place l'écluse à sas vers l'aval et on construit à l'origine une écluse de garde. Le type usuel des écluses de garde présente une paire de portes busquées vers l'amont, dont la fermeture, lorsque la rivière dépasse la limite des hautes eaux navigables, empêche les fortes crues de s'introduire dans la dérivation. Parfois, l'écluse de garde a deux paires de portes busquées en sens inverse et mettant la dérivation à l'abri des abaissements aussi bien que des relèvements excessifs du niveau de l'eau dans la rivière. L'exposition allemande de 1900 montrait des portes de garde formées d'un vantail métallique, à galets supérieurs de roulement, qui s'appuyait à volonté contre la tête amont ou la tête aval d'un pont et remplissait ainsi l'office d'une écluse à double paire de portes.

Depuis le ^{xv}e siècle, époque à laquelle elle fut inventée par Philippe Visconti, selon les uns, par Léonard de Vinci, selon les autres, l'écluse à sas, qui assure la transition verticale d'un bief de rivière ou de canal au suivant, a conservé ses dispositions générales sans modification essentielle. Mais une tendance très nette s'est manifestée, surtout vers la fin du siècle, en faveur de l'agrandissement des écluses, de manière à permettre le passage de bateaux d'un plus fort tonnage ou de trains remorqués : c'est ainsi que la grande écluse de Bougival a 220 mètres de longueur et 17 mètres de largeur. D'autre part, on augmente la chute afin de réduire le nombre des sas, au grand profit de la navigation. Les procédés de construction ont été perfectionnés; le métal est venu fournir des ressources nouvelles pour les portes hautes et larges. L'art de l'ingénieur a aussi réalisé de nombreux progrès dans les moyens de remplissage du sas, de vidange, de manœuvre des portes; dans certaines écluses, les anciens appareils rustiques ont

fait place à des presses hydrauliques et à des cabestans, qui ouvrent ou ferment les portes, lèvent ou abaissent les vannes et servent à la traction des bateaux. Des moyens intéressants ont été imaginés en vue de diminuer la consommation d'eau due aux éclusées : tels le flotteur de Béthancourt et l'appareil de Caligny. À l'exposition allemande de 1900 figuraient les curieuses écluses du canal de l'Elbe à la Trave, établies par M. Hottopp et offrant les particularités suivantes : bassins d'épargne; aqueducs de remplissage et de vidange, mis en fonctionnement au moyen de siphons et d'un réservoir d'amorçage; porte d'amont tournant autour d'un axe horizontal inférieur et se relevant ou se rabattant sous l'action d'envois alternatifs d'air comprimé par la chute ou d'eau dans une chambre du vantail; portes busquées d'aval manœuvrées à l'aide d'un flotteur à contrepoids, alternativement rempli d'air comprimé ou d'eau. La section hongroise montrait une écluse du canal François munie de portes roulantes, suspendues à un pont et manœuvrées électriquement. Dans la section française, on remarquait une écluse du canal de Roanne à Digoin, avec porte à deux vantaux non busqués s'appuyant contre un masque métallique supérieur, et les écluses du canal de la Marne à la Saône, pourvues de déversoirs circulaires et d'alimentateurs automatiques pour la transmission des eaux de bief en bief.

Jadis, quand le tracé d'un canal avait à gravir une forte pente, on en était réduit à diminuer outre mesure la longueur des biefs, parfois à construire des échelles d'écluses accolées à la suite les unes des autres, sans intercalation de biefs intermédiaires. Cette solution avait divers inconvénients, en particulier celui d'imposer aux bateaux des pertes de temps et de restreindre la capacité de trafic. La pensée est venue de substituer des appareils d'élévation mécanique aux échelles d'écluses. On a d'abord songé aux plans inclinés, et, dès 1788, un ouvrage de ce genre était construit en Angleterre, sur le canal de Ketley : tantôt les plans inclinés transportent les bateaux à sec sur des chariots; tantôt ils guident sur leurs rails des sas roulants où flottent les bateaux qui s'écluent dans le bief supérieur et dans le bief inférieur. En 1838, James Green dota le canal Great Western d'un élévateur fait de deux sas mobiles équilibrés qui étaient mus au

moyen de chaînes. Depuis, un dispositif dérivé de celui de James Green, mais bien plus hardi et plus parfait, a été appliqué en Angleterre, en France et en Belgique. Il comporte deux presses hydrauliques ou deux groupes de presses, conjugués de telle sorte que les pistons d'un groupe effectuent leur course verticale dans le sens ascendant, tandis que les autres l'effectuent dans le sens descendant; chaque groupe soutient une bêche pleine d'eau où peut pénétrer un bateau et qu'un jeu de portes met en communication avec le bief supérieur ou avec le bief inférieur. À Anderton en Angleterre (1875), il s'agissait de barques dont le tonnage ne dépassait pas 100 tonnes; néanmoins l'entreprise était audacieuse et son succès put seul la légitimer dans l'esprit de beaucoup d'ingénieurs. L'ascenseur des Fontinettes, sur le canal de Neuffossé, dessert le trafic entre le réseau de navigation intérieure et les ports de Dunkerque, Gravelines et Calais; il livre passage à des bateaux de 300 tonnes et remplace cinq écluses; chacune des bèches repose sur un piston unique, supportant une charge de 800 tonnes et présentant un diamètre de 2 mètres pour une dénivellation de 13 m. 13. À la Louvières, en Belgique, les conditions diffèrent peu de celles des Fontinettes. Très récemment, le canal de Dortmund à l'Ems a été doté d'un ascenseur dont le principe est tout autre : un sas mobile capable de recevoir des bateaux de 600 tonnes repose sur des flotteurs d'un diamètre de 8 m. 30 plongeant dans des puits; sa descente ou sa montée sont provoquées par l'addition ou l'enlèvement d'une tranche d'eau; il a une course de 14 à 16 mètres; des vis solidaires commandées par une dynamo régularisent les mouvements et, au besoin, arrêtent le sas.

Les longs biefs de canaux sont utilement fractionnés par des portes de sûreté, qui préviennent la vidange complète en cas d'accidents ou de réparations. Pour le canal de Dortmund à l'Ems, les ingénieurs allemands ont eu recours à des vannes à contrepoids tournant autour d'un axe horizontal et susceptibles de maintenir le niveau normal, soit d'un côté, soit de l'autre.

À la traversée des rivières, les voies navigables artificielles exigent la construction de ponts-canaux. Ces ouvrages sont entièrement en maçonnerie ou ont une bêche métallique (fonte, fer, acier). L'emploi

de la tôle de fer a été inauguré au pont-canal de l'Albe, sur le canal des houillères de la Sarre, et celui de la tôle d'acier au pont-canal de Briare, sur le canal latéral à la Loire.

Une des questions les plus délicates que les ingénieurs aient à résoudre pour les canaux à point de partage est celle de l'alimentation, surtout au point culminant où les ressources alimentaires sont ordinairement peu abondantes. Il faut soit emmagasiner les eaux pluviales dans des réservoirs, soit effectuer des prises d'eau par machines élévatoires dans des rivières ou des ruisseaux situés à un niveau inférieur. Les digues des réservoirs sont en terre, en maçonnerie ou en terre et maçonnerie combinées; cette dernière disposition a toutefois un caractère exceptionnel. Rarement en France, les barrages en terre dépassent 20 à 25 mètres de hauteur; ils conviennent plus particulièrement au cas d'une retenue peu élevée ou d'un sol n'offrant pas les garanties d'incompressibilité voulues pour la fondation d'un barrage maçonné; la digue est constituée par un corroi d'argile sableuse et revêtue, vers l'amont, d'un perré maçonné à gradins et à zones indépendantes. Les barrages en maçonnerie doivent être assis sur un sol incompressible et inaffouillable, présenter une parfaite homogénéité, former de véritables monolithes, ne comprendre que des matériaux de choix, rester impénétrables aux plus minces filets d'eau, avoir un profil rationnel et largement calculé; aujourd'hui, les méthodes abondent pour la vérification de leur stabilité, car peu de problèmes ont autant exercé la science des ingénieurs; le rapport du jury des travaux publics à l'Exposition de 1900 signale certaines innovations, par exemple l'emploi de murs à contreforts et à évidements, protégeant la face amont contre les infiltrations. Quelle que soit la nature du barrage, les réservoirs exigent des ouvrages accessoires, prise d'eau, bonde de fond, déversoir; des précautions extrêmes s'imposent pour que ces ouvrages ne créent pas des points faibles dans la digue et, si celle-ci est en terre, pour que les eaux ne puissent se frayer un chemin au contact de la maçonnerie et du remblai : un déversoir-siphon, établi par Hirsch au réservoir de Mittersheim (canal des houillères de la Sarre), mérite d'être cité eu égard à son élégante ingéniosité; le réservoir de Paroy, construit par l'auteur de ce livre pour le canal de la Marne au

Rhin, donne un exemple d'ouvrages plus simples bien appropriés aux barrages en terre et réunissant toutes les garanties requises de sécurité. Les désastres réitérés et terribles occasionnés en divers pays par la rupture de barrages d'apparence robuste commandent une extrême prudence.

Quant aux machines élévatoires, elles sont mues par la vapeur ou par des chutes d'eau. J'ai eu moi-même à installer, comme ingénieur, pour l'alimentation du canal de la Marne au Rhin et du canal de l'Est, de puissantes usines hydrauliques à Valcourt et à Pierre-la-Treiche sur la Moselle, ainsi qu'une usine à vapeur près de Vacon : ces travaux étaient représentés à l'Exposition universelle de 1889. Les ingénieurs du canal de Bourgogne ont récemment organisé une prise d'eau dans la Saône et des refoulements de bief en bief au moyen de l'énergie électrique empruntée à une chute de la rivière.

L'aménagement et l'outillage des ports fluviaux avaient été trop longtemps négligés. Un souci mieux entendu des besoins de l'exploitation s'est manifesté vers la fin du siècle. L'Allemagne a ouvert la voie en développant ses ports fluviaux avec autant d'ampleur que ses ports maritimes. Rien ne doit être négligé pour mettre à la disposition des intéressés les magasins, les hangars, les grues fixes ou mobiles et les autres constructions ou appareils qui peuvent leur être utiles.

Dès 1822, le touage à vapeur était expérimenté sur la Seine; ce mode de traction et le remorquage ont pris possession des fleuves régularisés et des rivières canalisées dont les écluses présentent des dimensions suffisantes pour livrer passage aux convois sans en exiger le morcellement; souvent, le remorqueur, capable d'aller chercher rapidement du travail, lutte avec avantage en basses eaux contre le toueur immobilisé sur sa chaîne, tandis qu'au contraire le toueur, n'ayant pas l'eau comme point d'appui, reprend le dessus, du moins à la remonte, quand des crues augmentent la vitesse du courant. Une catégorie curieuse de remorqueurs, celle des grapins du Rhône, se recommande à l'attention par les services qu'elle a rendus.

Plusieurs pays ont entrepris des tentatives dans le but de substituer la traction mécanique à la traction animale sur les canaux. Mais le halage garde habituellement une incontestable supériorité écono-

mique. L'intérêt de la question s'accuse surtout pour certains passages rétrécis où le halage est malaisé et pour les voies à trafic très intense que soulagerait un accroissement de la vitesse. Une solution expérimentée d'abord en Belgique, puis en France et en Allemagne, a pour principe l'emploi d'un câble métallique qui court sur la rive et auquel s'amarrent les bateaux; des dispositions imaginées par M. Maurice Lévy et remarquables par leur ingéniosité, notamment au point de vue de l'échappement des amarres à la rencontre des poulies, ont été appliquées aux canaux Saint-Maurice, Saint-Maur et de l'Aisne à la Marne (souterrain de Mont-de-Billy). Il y a lieu de citer aussi différentes installations de touage, comme le touage à la vapeur surchauffée du souterrain de Mauvages et le touage électrique du souterrain de Pouilly.

De 1890 à 1895, M. l'ingénieur en chef de Mas a procédé à des expériences suivies sur les efforts nécessaires pour la traction, à diverses vitesses, des différents types de bateaux en usage. Ces expériences ont établi que de faibles écarts dans les formes de l'avant pouvaient faire varier la résistance du simple au double et même davantage. Il y a là des indications précieuses et, peut-être, le germe d'une transformation féconde dans le matériel de la batellerie.

Le trafic par porteurs à vapeur reste très faible comparativement à celui que desservent les bateaux halés, toués ou remorqués. En 1900, il n'a représenté, pour l'ensemble de nos voies navigables, que 1.9 p. 100 du poids total des embarquements et 2.2 p. 100 du tonnage kilométrique.

Autrefois assez actif, le flottage est aujourd'hui insignifiant: en 1900, 0.6 p. 100 du total des embarquements sur le réseau français et 0.3 p. 100 du tonnage kilométrique.

Parmi les circonstances susceptibles d'entraver la navigation, l'une des plus nuisibles est la gelée dans les régions à climat rigoureux. Des bateaux à vapeur brise-glace, doués parfois d'une grande puissance, sont maintenant employés en Allemagne et en Russie pour maintenir la navigation libre pendant l'hiver dans les fleuves, les lacs et surtout les estuaires aboutissant à de grands ports maritimes.

4. Navigation maritime. — 1. *Ports et canaux maritimes.* — Les ports maritimes actuels datent de la navigation à vapeur, dont les perfectionnements continus rendent toujours insuffisante l'œuvre de la veille. Chaque année apporte avec elle des besoins nouveaux, auxquels il faut satisfaire sous peine de déchéance. Augmentation ininterrompue du mouillage, agrandissement des écluses et des formes de radoub, abréviation des délais d'entrée et de sortie, facilités plus grandes pour la manutention expéditive des marchandises, amélioration des raccordements avec les voies ferrées, tels sont les principaux articles du programme dont les armateurs poursuivent sans relâche la réalisation et qui sollicite les incessants efforts des ingénieurs. Ce programme s'impose comme une conséquence nécessaire des sacrifices faits dans tous les pays, afin d'accroître les dimensions et la vitesse de marche des navires.

Touchant à l'Atlantique et à la Méditerranée par un littoral immense, la France a dû, pendant le cours du XIX^e siècle, consacrer des sommes fort élevées à la construction, à l'amélioration et à l'entretien de ses ports. Le tableau suivant récapitule les dépenses en travaux extraordinaires et en travaux ordinaires sous les divers gouvernements qui se sont succédé depuis 1814⁽¹⁾:

PÉRIODES.	TRAVAUX EXTRAORDINAIRES.				TRAVAUX ORDINAIRES.	ENSEMBLE.
	FONDS			ENSEMBLE.		
	DU TRÉSOR.	D'AVANCES.	DE CONCOURS.			
	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.
1814-1830 ..	23,559,000	#	#	23,559,000	21,820,000	45,379,000
1831-1847 ..	122,499,000	#	#	122,499,000	61,457,000	183,956,000
1848-1851...	28,948,000	#	42,000	28,990,000	16,261,000	45,251,000
1852-1870...	193,272,000	11,088,000	24,523,000	228,883,000	91,530,000	320,413,000
1871-1900...	407,365,000	155,368,000	109,012,000	671,745,000	217,601,000	889,346,000
TOTAUX...	775,643,000	166,456,000	133,577,000	1,075,676,000	408,669,000	1,484,345,000

À elles seules, les dépenses des vingt-deux dernières années (1879-1900) représentent la moitié environ des dépenses du siècle. C'est, en effet, pendant cette période de vingt-deux ans qu'ont été entreprises et

(1) Y compris les phares, fanaux, balises.

poursuivies les grandes opérations décidées en principe, sur la proposition de M. de Freycinet, par la loi du 28 juillet 1879.

Le tableau précédent montre d'ailleurs l'extrême importance prise, durant la période 1871-1900, par les avances et les subsides des départements, des villes et des chambres de commerce. Autrefois prélevés sur les ressources du budget, les intérêts des avances sont plus généralement aujourd'hui couverts par des péages locaux. L'amortissement des subsides est de même assuré, dans la plupart des cas, au moyen de perceptions locales.

Un nouveau classement de travaux d'amélioration vient d'être décidé par le Parlement. Il comprend dix de nos ports. Les intéressés apporteront un large concours financier.

Il n'existe pas de travaux aussi variés que ceux des ports maritimes. Ces travaux se diversifient à l'infini suivant la situation des lieux, l'action de la mer, la nature du port, les besoins spéciaux du commerce, etc. La meilleure méthode pour les faire connaître est celle des monographies; mais elle serait hors de mise ici. Ne pouvant y recourir, je me bornerai à quelques indications sommaires et générales.

Un bon port doit être précédé d'une rade, à moins que la profondeur de son entrée ne soit suffisante pour laisser pénétrer les navires à tout instant de la marée. Les rades sont fermées ou foraines. Outre les rades donnant accès aux ports, il y en a qui servent à la relâche des navires surpris par la tempête ou par l'ennemi et leur offrent un refuge temporaire. On distingue les rades naturelles et les rades couvertes au moyen de digues d'abri; ces digues ménagent des passes assez larges pour être aisément franchies et cependant assez resserrées pour empêcher l'agitation du dehors d'envahir la rade. L'expérience du XIX^e siècle a fourni des données plus précises au sujet des questions délicates que soulèvent le tracé des digues et l'ouverture des passes.

Dans les mers à faibles variations de niveau et souvent dans les parties maritimes des fleuves, le port ne comprend que des quais abrités par des digues et disposés, tantôt le long du rivage, tantôt autour de bassins creusés ou conquis sur la mer, tantôt en saillie sur la rive, de manière à constituer des môles, des traverses, des appontements ou

des wharfs, qui soient accostables des deux côtés et qui dessinent une suite de darses ou bassins.

Quand, au contraire, la marée provoque des dénivellations notables, l'accès du port est ordinairement assuré par un chenal ou goulet, que limitent des jetées parallèles ou convergeant vers le large et s'avancant jusqu'à des profondeurs convenablement choisies; ces jetées sont établies de façon à abriter l'avant-port contre les lames, à faciliter les mouvements des navires et à guider les courants de chasse. Dans plusieurs ports, on a reconnu la nécessité d'accroître les largeurs réduites jadis assignées aux chenaux : l'élargissement rend plus aisés le passage et le croisement des grands bateaux, diminue les chances d'obstruction et n'a d'inconvénients ni au point de vue de la traction, depuis le remplacement du halage par le remorquage, ni au point de vue de l'entretien du chenal, depuis l'extension des dragages; il permet d'ailleurs aux dragues de remplir leur rôle sans entraver la navigation. Si la plage est formée de matériaux meubles, les ingénieurs doivent se préoccuper très attentivement de l'influence que les ouvrages exerceront sur le régime des fonds et adopter des solutions appropriées à chaque cas particulier. Parfois, le port se compose de bassins en libre communication avec la mer ou le fleuve, dits *bassins de marée*; mais, habituellement, il présente des bassins à flot, où les eaux sont maintenues à un niveau peu différent de celui des hautes mers et auxquels les navires accèdent par des écluses simples ou à sas et des bassins de mi-marée. Les écluses simples ne permettent l'entrée et la sortie qu'à l'heure du plein; grâce aux bassins de mi-marée, il devient possible d'admettre à un moment déterminé les navires venus après la fermeture des écluses simples et d'avancer le départ d'autres bâtiments. En avant des écluses est ménagé un bassin de marée ou avant-port, dans lequel les navires perdent leur erre et évoluent. Des brise-lames ou chambres d'épanouissement à plafond incliné, construits le long du chenal et aux abords des écluses, contribuent à doter l'avant-port du calme nécessaire. Beaucoup de ports à trafic intense sont pourvus de plusieurs entrées, disposition favorable pour l'exploitation, en même temps que sauvegarde contre le danger d'obstruction par un sinistre.

Les anciennes digues en matériaux de toute grosseur jetés pêle-mêle manquent de stabilité dans les mers ouvertes et agitées. Pour les mers sans marée, l'expérience a consacré les digues en enrochements de dimensions modérées, défendues du côté extérieur ainsi qu'au sommet par de gros blocs et vers l'intérieur par des enrochements de fort échantillon; tantôt les enrochements du noyau sont classés de telle sorte que les plus petits se trouvent à la base et au centre, tantôt ils restent mélangés, et ce second système joint à l'avantage de la simplicité le mérite de fournir des ouvrages plus étanches, se laissant moins traverser par les lames. Si la digue a pour unique objet d'abriter un mouillage, son relief sur la mer peut être faible et il est alors opportun d'arrimer les blocs de couronnement; si la digue abrite des bassins ou des quais servant aux opérations de chargement et de déchargement des navires, elle doit opposer à la mer un obstacle infranchissable et porte à cet effet un mur d'abri ou parapet séparé du talus extérieur par une plate-forme, qui reçoit utilement une légère inclinaison. Pour les mers à marée, une infrastructure en enrochements montée jusqu'au niveau des basses mers et, par-dessus, une muraille avec risberme bien défendue offrent des garanties sérieuses de durée et de bonne tenue; les digues à parements verticaux coûtent moins cher, mais courent plus de risques; en tout cas, il convient d'asseoir les ouvrages de ce dernier type sur un tapis d'enrochements protégé au besoin par de gros blocs et d'employer dans le massif des blocs en maçonnerie plutôt que du béton coulé; les assises inclinées sont alors préférables aux assises horizontales. À l'Exposition de 1900, les spécialistes remarquaient des blocs artificiels pesant jusqu'à 5,000 tonnes et employés tant à Bizerte, pour le corps d'une digue, qu'à Heyst-Zeebrugge, pour le mur d'abri d'une jetée et pour un quai : ces blocs ont été faits à l'aide d'une carcasse en métal et maçonnerie ou béton, qu'on échouait et qu'on remplissait ensuite de béton.

Deux systèmes sont appliqués pour les jetées encadrant le chenal : celui des jetées basses à formes arrondies et talus peu inclinés, que surmonte le plus souvent une estacade ou jetée haute; celui des jetées pleines, ne pouvant être franchies par les lames, si ce n'est lors des

tempêtes exceptionnelles. Les jetées basses troublent peu le régime des courants aussi bien que la propagation des lames, maintiennent par suite dans le chenal une agitation quelquefois gênante pour les navires et y laissent tomber des alluvions si elles sont établies sur des plages sablonneuses; elles se composent en général de petits matériaux, avec chemise d'enrochements, maçonnés le cas échéant à bain de mortier; le pied en est défendu par des fascinages, des enrochements, des pieux et palplanches, etc. Quant aux estacades, elles sont formées le plus habituellement de fermes en bois et d'un plancher ou tillac, servant à la circulation et au halage; le fer tend à remplacer le bois dans la structure des fermes. Divers essais de coffrages, destinés à prévenir les inconvénients des claires-voies, n'ont pas donné de très heureux résultats. Les jetées pleines procurent aux navires un meilleur abri, mais arrêtent les sables, déterminent un avancement des plages auquel il faut pourvoir, provoquent quelquefois l'envasement du chenal, engendrent de l'agitation près des musoirs; ces défauts ne suffisent pas à leur enlever la supériorité dans la plupart des cas; elles se rattachent à des types fort variés (petits matériaux et per-rés, enrochements, enrochements et fascinages, murs en maçonnerie à parements inclinés, murs analogues avec noyau en maçonnerie sèche, etc.). Afin d'éviter les ensablements dus aux jetées continues, plusieurs ingénieurs ont eu recours à des jetées discontinues; l'expérience n'a pas réussi. Les brise-lames ont leur plafond légèrement incliné et solidement maçonné; ils doivent offrir assez de largeur pour le déferlement des lames et présenter une longueur se rapprochant de l'ouverture du chenal; sur le seuil est placée une estacade analogue à celles des jetées basses.

Ne pouvant décrire ici dans leurs détails les procédés de construction des digues et jetées, je me borne à quelques indications spéciales. Les enrochements sont directement déchargés des wagons ou immergés, soit au moyen de chalands à clapets, soit au moyen de bateaux qu'on décharge à la bande. Pour le transport et l'échouage des blocs artificiels, les constructeurs se servent de bardeurs, de chariots lève-blocs, de ponts roulants, de chariots porteurs, de chalands jumelés, de flotteurs, de chalands à puits, de pontons-bigues, de bateaux

déchargés à la bande. Les digues en blocs arrimés exigent l'emploi de titans.

Les bassins ont leur longueur limitée par les besoins des communications d'une rive à l'autre et par la nécessité de prévenir une houle dangereuse ou simplement gênante; leur largeur, variable avec les dimensions des navires qui fréquentent le port et avec la position que prennent ces navires pour leurs opérations, ne peut être exagérée sans inconvénients, en particulier au point de vue de la frappe des amarres nécessaires à la manœuvre. Une disposition excellente consiste à diviser le bassin en un certain nombre de darses, par des môles établis sur l'un de ses bords et orientés autant que possible suivant des directions obliques afin d'éviter les plaques tournantes dans le réseau des voies ferrées de service. Quand les berges des bassins restent en talus, on peut les pourvoir d'estacades discontinues ou continues; ces estacades sont quelquefois remplacées par des appontements en maçonnerie, isolés ou reliés au moyen de charpentes. Mais ordinairement on entoure les bassins de quais en charpente ou mieux en maçonnerie. Les murs de quai ont en général du fruit. Ils se rattachent à des types divers selon la nature du sol de fondation. Le cas le plus simple est celui d'un terrain incompressible et inaffouillable; dans le rocher, un simple revêtement peut suffire. Si le mur repose sur un terrain incompressible, mais affouillable, une défense du pied ou un fort enracinement deviennent indispensables. Un sol compressible exige des pilotis (souvent inclinés), des plates-formes, des gril-lages, parfois des contreforts ou des massifs d'ancrage, et, lorsqu'il y a danger d'affouillement, une défense du pied de l'ouvrage. Dans les terrains vaseux, la difficulté s'accroît, le problème appelle des solutions complexes et délicates : fondation sur pilotis et plate-forme ou par puits havés; amélioration préalable du sol, à l'aide d'une large incorporation de sable; construction de murs légers et spécialement de véritables viaducs avec voûtes ou linteaux; remblai à l'arrière avec des matières exerçant peu de poussée ou avec des enrochements; etc. La fondation de nombreux murs est constituée par des blocs artificiels reposant soit sur le sol, soit sur des enrochements, soit sur du béton. En étudiant l'exécution des quais dans les différents ports, on y re-

trouve tous les procédés de fondation précédemment énumérés : emploi de caissons sans fond amovibles ou non ; utilisation de cloches à plongeur ; enfoncement de pieux et palplanches par injection d'eau ; havage ; travail dans l'air comprimé ; etc.

Au lieu d'accoster les appontements ou murs de quai adossés aux rives des bassins, les navires viennent quelquefois se ranger le long de jetées ou estacades à claire-voie (wharfs, piers, etc.), tantôt construites en charpente de bois plus ou moins légère, tantôt établies en métal comme à Kotonou et à Grand-Bassam, tantôt affectant la forme de véritables ponts suspendus.

Le rapide accroissement du tonnage des navires a entraîné une augmentation corrélatrice des dimensions attribuées aux écluses. Actuellement, la largeur de ces ouvrages, mesurée à la partie supérieure, atteint 30 mètres et 30 m. 50. Leur profondeur n'a pas moins progressé : le haut radier de la dernière écluse construite au Havre, par exemple, est immergé de 4 m. 55 en basse mer de vive eau ordinaire, de 6 m. 65 en basse mer de morte eau, de 10 m. 15 en pleine mer de morte eau, de 11 m. 85 en pleine mer de vive eau. Enfin la longueur des sas va jusqu'à 240 mètres ; souvent, des portes intermédiaires la divisent et fournissent ainsi deux ou trois sas d'éten-dues différentes, servant à volonté suivant les dimensions des navires. Dans les bajoyers et exceptionnellement sous le radier sont ménagés des aqueducs destinés aux manœuvres d'eau ; pour les grands sas, on multiplie les orifices afin d'éviter des courants dont les navires pourraient souffrir. Une pratique fréquente consiste à accoler deux écluses, dont l'une simple et l'autre à sas : cette disposition accélère les mouvements et prévient les interruptions de service en cas d'avarie. Les fondations des écluses se font comme celles des murs de quai, mais exigent peut-être plus de soins encore, car la stabilité de la construction doit être absolue. Bien que l'usage de la maçonnerie soit de beaucoup le plus général, les pays du Nord et de l'Amérique ont des écluses en charpente.

D'ordinaire, les écluses simples ne présentent qu'une seule paire de portes ; cependant elles en ont deux, pour la facilité des opérations ou des changements de vantaux, quand elles desservent un bassin qui

ne peut être asséché. Par leur nature même, les écluses à sas sont pourvues de deux paires de portes au moins. Outre les portes d'èbe, retenant l'eau dans les bassins pendant le jusant, des portes de flot s'imposent, soit lorsque le plan d'eau du bassin est maintenu en contre-bas du niveau de la pleine mer, soit lorsqu'une protection est nécessaire contre les lames et le clapot arrivant du large. Jusqu'à une époque récente, les ingénieurs recouraient exclusivement aux portes busquées en bois : depuis, le fer et l'acier se sont substitués au bois, apportant avec eux des avantages de rigidité, d'économie, de durée, et facilitant la conservation des vantaux de rechange; l'emploi de caisses à eau et à air a permis de régler la pression sur les pivots et les colliers; dans certaines circonstances, les portes busquées, qui demandent une construction très précise et dont la manœuvre nécessite des soins extrêmes, ont été avantageusement remplacées par un vantail unique; l'air comprimé est venu fournir un moyen commode de vidange des compartiments. Quelques écluses sont munies de portes busquées en éventail, capables de résister dans les deux sens à la pression de l'eau et faciles à manœuvrer au milieu du courant, quels que soient le sens et la vitesse de ce courant. Il existe aussi des portes roulantes, servant à volonté de portes d'èbe ou de flot et se garant dans une chambre ménagée à travers l'un des bajoyers. Les manœuvres des portes se font à bras ou mécaniquement, par l'eau sous pression, l'air comprimé, etc. Aux portes busquées peuvent être adjointes des portes-valets, empêchant les vantaux de se rouvrir sous l'action de la houle; celle-ci est encore combattue par d'autres procédés, tels que l'adaptation de ressorts Belleville ou de freins hydrauliques aux chaînes de retenue. Les vannes usuelles sont des vannes levantes en bois ou en métal, parfois équilibrées et glissant sur des galets; on recourt aussi aux vannes en éventail, aux vannes tournantes à axe vertical, aux vannes cylindriques.

Tout port de quelque importance possède des instruments de radoub, pour la visite et la réparation des navires. Au premier rang, il y a lieu de placer les formes ou cales sèches, bassins susceptibles d'être mis à sec après que les navires à visiter ou à réparer y ont été intro-

duits. Comme les dimensions des écluses à sas, celles des formes de radoub n'ont cessé de s'accroître : leur longueur totale atteint 267 mètres, leur longueur sur tins 251 mètres, la largeur de leur pertuis d'entrée 38 mètres. Dans la plupart des ports, les bâtiments ne peuvent y pénétrer à pleine charge qu'en vive eau. La fermeture en est assurée par des portes busquées ou par des bateaux-portes : ce dernier système procure une étanchéité plus parfaite et réduit la longueur de l'écluse d'entrée. Certaines formes sont accessibles par les deux extrémités ; dans ce cas, elles peuvent être disposées pour recevoir plusieurs navires et comporter, à cet effet, un bateau-porte intermédiaire. Les bajoyers présentent des gradins, des escaliers et des glissières, respectivement destinés à l'accorage des navires, au mouvement du personnel et à ceux du matériel. Autrefois, le radier était concave et les rigoles d'assèchement se trouvaient vers l'axe de la forme ; maintenant, on préfère le renforcer en son milieu, lui donner deux pentes partant de l'axe et placer les rigoles au pied des bajoyers de la forme. Le plus souvent, des aqueducs sont pratiqués dans les bajoyers de l'écluse pour le remplissage ; un aqueduc de vidange conduit les eaux vers le puisard. Sauf les précautions spéciales que commandent les sous-pressions ou qu'impose le besoin d'une étanchéité absolue, la construction des formes offre une similitude complète avec celle des écluses. L'Amérique du Nord a établi et établit encore des formes en charpente. Il est très rare que le simple jeu de la marée suffise à la vidange ; l'opération doit presque toujours être complétée ou faite entièrement au moyen de pompes à piston ou plutôt de pompes centrifuges mues par la vapeur ; une machinerie distincte sert à l'évacuation des eaux de pluie et d'infiltration. Des grues permettent de manutentionner facilement les pièces lourdes.

Les bateaux-portes employés pour la fermeture des cales sèches sont des écrans étanches amovibles qu'on coule au travers de la passe d'entrée ou qu'on fait flotter, par l'introduction ou l'enlèvement d'un lest d'eau. Primitivement, ils étaient en bois ; mais, depuis longtemps, l'usage du fer et de l'acier a prévalu. Quel que soit le type adopté, des chambres à air et des chambres à eau, contenant le lest permanent ou le lest de manœuvre, doivent être aménagées dans la coque. Souvent,

le bateau est surmonté d'une passerelle ou d'un pont avec voie charretière. À l'étranger, les bateaux-portes sont quelquefois remplacés par des caissons roulants.

Des ouvrages ou appareils autres que les formes de radoub ont été imaginés pour la réparation des navires. Parmi les plus anciens, on peut citer les grils de carénage, plates-formes en charpente légèrement inclinées vers le large, sur lesquelles sont échoués à mer baissante les bâtiments de petites dimensions. La puissance des cales de halage ou slips est plus grande; elles consistent en plans inclinés, établis pour partie au-dessus de l'eau et pour partie au-dessous; les navires, portés par des chariots mobiles à glissement ou à roulement (bers ou berceaux), y sont hissés soit à bras, soit au moyen de treuils à vapeur, soit à l'aide de presses hydrauliques; on distingue les cales longitudinales, qui placent la quille perpendiculairement au rivage, et les cales transversales, qui la placent parallèlement à la rive, offrant ainsi plus de facilité et de sûreté pour la manœuvre; les unes et les autres sont construites en bois ou en maçonnerie et reçoivent des bâtiments dont le poids atteint 3,000 ou même 5,000 tonnes. Edwin Clark a créé un appareil élévateur fort ingénieux, constitué par deux files parallèles de presses hydrauliques soutenant un gril; après avoir élevé le gril presque à fleur d'eau et y avoir échoué un ponton avec berceau amovible, on introduit de l'eau dans ce ponton et on le descend à une profondeur suffisante pour recevoir le navire; puis on relève le gril, on vide le ponton et on abaisse de nouveau l'appareil jusqu'à ce que ce ponton flotte en supportant le navire; ponton et navire sont alors emmenés dans une petite darse, et l'élévateur redevient disponible; la remise à flot s'effectue par des opérations inverses. Les formes flottantes se composent essentiellement d'un plancher et de flotteurs; des manœuvres convenables d'introduction d'eau dans les flotteurs et d'évacuation de cette eau permettent d'immerger le plancher, d'y placer le navire, enfin de relever le tout; jadis en bois, ces formes sont maintenant construites en fer ou acier; elles peuvent, au besoin, servir pour des bâtiments pesant plus de 10,000 tonnes. Tandis que, dans le type ordinaire des docks flottants, le plancher s'élève au-dessus du niveau de l'eau, quelquefois il reste immergé d'une certaine quantité; la forme

est alors fermée à l'une de ses extrémités par une paroi fixe, à l'autre par une porte mobile, et il faut la vider par épuisement. Certaines formes flottantes ne sont utilisées que comme instruments d'accès aux cales de halage. MM. Clark et Stanfield ont inventé des docks flottants, dont la fonction est de soulever les navires et de les déposer sur un gril de carénage établi au-dessus du niveau de l'eau, ainsi que des docks éleveurs, formes flottantes d'un genre spécial. En définitive, la forme de radoub est l'instrument le plus parfait et doit être préférée, dès que les navires fréquentant le port sont assez nombreux et présentent de grandes dimensions.

Parmi les ouvrages divers des ports, quelques-uns méritent d'être signalés. L'embarquement et le débarquement des personnes et des colis ou des marchandises peuvent exiger la construction de cales inclinées et, pour les ports à marée, d'embarcadères spéciaux : les embarcadères fixes consistent, par exemple, en planchers étagés dans des enclaves d'un mur de quai ; quant aux embarcadères flottants, ils sont constitués par des plates-formes sur flotteurs ou sur pontons, auxquelles des ponts ou passerelles donnent accès. Partout où s'effectuent le chargement et le déchargement des pétroles, les bassins ou parties de bassins dans lesquels ont lieu ces opérations doivent être isolés au moyen de barrages qui, en cas d'incendie, empêchent l'huile de se répandre au dehors et de propager le feu : tantôt les barrages sont simplement formés de poutres en bois avec revêtement en tôle ; tantôt on recourt à des caissons métalliques étanches. La construction des navires nécessite des cales inclinées analogues aux cales de halage ; pour le lancement, ces cales reçoivent des berceaux qui se mettent en mouvement à l'instant voulu, emportent le navire jusqu'à la mer, puis l'abandonnent et coulent sous l'eau.

À propos de la navigation intérieure, j'ai déjà signalé les briseglace. Dans les pays à climat rigoureux, il est également indispensable d'empêcher l'obstruction par les glaces des accès aux ports maritimes ou, du moins, d'en restreindre la durée. Les bateaux employés à cet effet sont, ou des remorqueurs dont l'avant est armé de charrues à double versant, ou des bateaux échoueurs très arrondis de l'avant et

pourvus de water-ballasts à l'aide desquels on procède à des mouvements d'eau qui font émerger l'étrave en route libre et qui, au contraire, l'abaissent devant les blocs résistants pour briser ces blocs par écrasement.

Très souvent, les ports sont envahis par des dépôts qui en réduisent la profondeur. Ces dépôts peuvent représenter annuellement d'énormes volumes : 600,000 mètres cubes en moyenne à Dunkerque, 1 million 100,000 mètres cubes dans la nouvelle Meuse, 2,000,000 mètres cubes dans l'Elbe, en aval de Hambourg.

Un procédé classique pour se débarrasser des alluvions est celui des chasses, effectuées à basse mer au moyen d'eaux empruntées soit à des retenues naturelles, soit aux bassins à flot, soit à des bassins spéciaux où elles ont été emmagasinées pendant la période de haute mer. C'est surtout en vive eau qu'il convient de procéder aux chasses : le cube d'eau disponible et la chute atteignent alors leur maximum ; d'autre part, la réduction des eaux stagnantes du chenal diminue la résistance opposée à l'action du courant et en augmente l'efficacité. Les bassins de chasse ont fréquemment une étendue considérable : à Calais, cette étendue est de 30 hectares ; à Ostende, le débit se chiffre par 1,100,000 mètres cubes en trois quarts d'heure. Des pertuis, des aqueducs ou des tuyaux convenablement disposés vomissent les eaux de chasse au moment voulu. Les pertuis sont généralement fermés par un vantail unique tournant autour d'un axe vertical qui le divise en deux panneaux d'inégale largeur ; ce vantail s'appuie à ses deux extrémités sur des poteaux-valets demi-cylindriques, également susceptibles de recevoir un mouvement de rotation après déclenchement ; le grand panneau est muni de ventelles levantes ou tournantes permettant, selon qu'elles sont fermées ou ouvertes, de donner la prédominance à la pression sur ce panneau ou sur le petit ; des manœuvres très simples déterminent l'ouverture ou la fermeture automatique du vantail ; aujourd'hui, les portes de chasse sont construites en fer ou en acier. Outre les portes de chasse, on adapte encore aux pertuis des portes busquées ou des vannes de garde.

Pour avoir l'efficacité désirable, les chasses exigent d'autant plus

d'eau que l'avant-port et le chenal offrent plus d'ampleur. Elles tendent à former une barre au delà des jetées, si les matières entraînées ne trouvent pas devant elles une fosse profonde ou un courant littoral assez puissant. Aussi la préférence est-elle maintenant donnée aux dragages, dont le prix a d'ailleurs notablement baissé.

À la question des ports de mer se rattache celle des canaux maritimes : canaux de pénétration, desservant de grandes villes situées à l'intérieur des terres ou au fond d'un golfe de faible profondeur; canaux latéraux, suppléant à une section de rivière dont l'amélioration eût été impraticable; canaux de jonction entre deux mers.

Parmi les canaux de pénétration figurent ceux d'Amsterdam à la mer du Nord (25 kilom.), de Manchester (57 kilom.), de Gand à Terneuzen (34 kilom.), de Bruges (10 kilom.), de Saint-Pétersbourg (27 kilom.), de Tunis (11 kilom.), de Königsberg (34 kilom.). Les canaux de Tancarville (25 kilom.), de Caen à la mer (15 kilom.), de la Basse-Loire (15 kilom.), de Saint-Louis (3 kilom.), sont des canaux latéraux. Enfin ceux de Suez (161 kilom.), de Corinthe (6 kilom.) et de Kiel (94 kilom.) appartiennent à la catégorie des canaux de jonction.

Vers la fin du siècle, un vif engouement s'est manifesté pour les canaux de pénétration. Le développement de divers ports établis sur des fleuves à grande distance du littoral était bien de nature à provoquer les ambitions. Comment des villes importantes qui, sans se trouver près de la mer, n'en sont cependant pas trop éloignées, eussent-elles résisté au désir de profiter des avantages qu'offrent les transports maritimes? Si quelques projets ont abouti, d'autres, très séduisants au premier abord, devaient échouer ou du moins subir un ajournement : de telles entreprises absorbent des capitaux considérables, risquent de jeter le trouble dans la situation commerciale de toute une région et n'apportent pas nécessairement les bénéfices escomptés par leurs promoteurs, car la navigation en canal n'est comparable à la navigation maritime proprement dite, ni au point de vue des facilités, ni au point de vue du prix.

Des raisons du même ordre ont empêché la réalisation de certains

projets relatifs à des canaux de jonction. L'accélération de la marche des navires à vapeur et la diminution réalisée dans la consommation des générateurs enlèvent leur intérêt aux raccourcis qui ne réduisent pas très notablement les parcours.

Le mouillage des canaux maritimes doit être sensiblement supérieur au tirant d'eau des navires; celui du canal de Suez a été porté en 1900 à 9 mètres, chiffre également admis comme minimum au canal de Kiel. Un jeu est de même nécessaire dans la largeur : le canal de Suez présente maintenant une ouverture au plafond de 37 mètres. La nature des défenses de rive varie selon que les eaux sont douces ou salées; leur importance dépend de l'intensité des courants; elles consistent en plantations de végétaux, fascinages, enrochements, perrés à pierres sèches, perrés maçonnés. Quand les canaux maritimes comportent des écluses, ces ouvrages sont de tous points analogues à ceux des ports.

Une des plus belles œuvres du siècle est certainement le canal de Suez, dû à Ferdinand de Lesseps. Par sa conception et par les procédés mis en œuvre pour son exécution, ce canal restera comme un monument du génie français. Commencé en 1859, il a été inauguré en 1869, date à jamais mémorable dans l'histoire économique du monde. De 437,000 tonnes en 1870, son trafic de marchandises s'est progressivement élevé à 10 millions de tonnes environ; 308,000 passagers l'ont franchi en 1896, année pendant laquelle le trafic-voyageurs a atteint son maximum; la traversée, qui exigeait quarante-huit heures au début, ne demande actuellement que dix-huit heures.

Après l'isthme de Suez, Ferdinand de Lesseps avait entrepris le percement de l'isthme de Panama. Interrompus faute de ressources financières suffisantes, les travaux vont être repris par les États-Unis.

Le remplacement de la marine à voiles par la marine à vapeur, l'accroissement continu de la valeur des navires, l'intérêt sans cesse plus grand qui s'attache à la réduction du séjour de ces navires dans les ports et à la diminution des délais de transport, les progrès du trafic maritime, le poids de plus en plus considérable des ouvrages mobiles

à manœuvrer et des produits à manutentionner, tout exige un ample et puissant outillage d'exploitation. À défaut de cet outillage, les travaux, si bien conçus et si bien exécutés soient-ils, ne peuvent satisfaire aux nécessités contemporaines et restent stériles. Il y a là un complément indispensable de la construction proprement dite, une tâche qui doit être accomplie largement et sans parcimonie. La France s'était laissé, à une certaine époque, distancer sous ce rapport par d'autres pays, et mon premier soin, quand le Gouvernement m'appela à la Direction de la navigation, fut d'y remédier en provoquant l'actif concours des chambres de commerce : aujourd'hui, notre défaillance passagère est effacée et nous avons vaillamment reconquis le terrain perdu.

Un élément essentiel de l'outillage est la machinerie destinée à mouvoir mécaniquement les portes d'écluses, les ponts mobiles, les vannes, les cabestans, les appareils de manutention. Cette machinerie peut être actionnée soit directement par la vapeur, soit par l'eau sous pression, soit par l'électricité, soit par l'air comprimé, soit par le gaz. Les indications qui lui ont été consacrées dans un précédent chapitre me dispensent d'y insister ici et me permettent de ne formuler que de très courtes observations générales.

Sauf exception, la vapeur nécessite pour chaque appareil un générateur et un moteur distincts, oblige ainsi à employer un nombreux personnel, multiplie les foyers dangereux au point de vue de l'incendie, force à entretenir les feux même lorsque la marche est intermittente, immobilise les engins pendant l'allumage et la mise en pression. Elle ne convient guère qu'aux installations secondaires, aux appareils isolés ou aux appareils groupés sur une faible étendue et susceptibles d'être alimentés par un générateur unique.

La commande au moyen de l'eau comprimée est devenue pour ainsi dire classique. Exceptionnellement, on se sert d'eau à faible pression empruntée aux canalisations urbaines : les moteurs sont alors volumineux et leur mise en marche peut donner lieu à quelques difficultés. Plus souvent, on a recours à l'eau comprimée par une usine centrale sous une pression de 50 à 60 kilogrammes par centimètre carré ; des conduites en fonte l'amènent aux divers points du port où elle sera

utilisée. L'énergie emmagasinée est toujours disponible et ne se dépense qu'au fur et à mesure des besoins; il suffit à l'usine centrale d'une puissance notablement inférieure au total des puissances qu'exigeraient des machines séparées; le personnel des mécaniciens se réduit dans une large proportion; les moteurs hydrauliques sont plus simples et moins délicats que les moteurs à vapeur. À la vérité, le rendement mécanique est faible. De plus, sous les climats rigoureux, il faut compter avec les risques de la gelée; toutefois des mesures préventives existent contre cette éventualité.

À peine est-il besoin de rappeler quels sont les divers organes nécessaires à la production, à la distribution et à l'emploi de l'eau sous pression. Refoulée par des pompes, l'eau va dans un accumulateur pourvu de plusieurs appareils de sûreté : l'un de ces appareils ferme l'introduction de la vapeur, lorsque l'accumulateur atteint le sommet de sa course, et la rouvre, lorsque le plongeur s'abaisse; un autre arrête la machine en cas d'accident à la canalisation; un troisième empêche dans le même cas la descente trop brusque du plongeur; le quatrième envoie, s'il y a lieu, aux réservoirs l'eau en excès provenant des pompes. Sur les longs réseaux de distribution, on intercale des accumulateurs de relais. Les canalisations sont formées de tuyaux en fonte à brides, avec garniture de gutta-percha aux joints; elles présentent des tuyaux compensateurs, des soupapes d'arrêt et des soupapes de choc. Tantôt la conduite est simple; tantôt elle est doublée d'une conduite de retour, qui ramène l'eau usée vers les pompes de compression, procure une économie considérable dans la consommation, diminue les dépôts sédimentaires, permet l'usage de la glycérine et du chlorure de magnésium pour prévenir les effets de la gelée. À ce dernier point de vue, d'autres moyens peuvent être mis en œuvre : utilisation d'eau fournie par la condensation des machines; chauffage à l'aide de becs à gaz ou de réchauds; mise en mouvement périodique de l'eau par des manœuvres à blanc. Certaines circonstances rendent la pression de régime insuffisante pour tel ou tel engin déterminé; on relève cette pression à 100, 200 kilogrammes, par l'interposition, près de l'appareil, d'un surcompresseur très simple. Les moteurs sont des appareils à action directe, des appareils funiculaires ou des appa-

reils à mouvement de rotation continue : ceux de la première catégorie servent, par exemple, à la manœuvre des vannes d'écluses, au soulèvement des ponts, à l'élévation des bateaux; ceux de la seconde catégorie, à l'ouverture et à la fermeture des ponts-tournants et des portes d'écluses, aux opérations de chargement et de déchargement, au transport vertical des marchandises dans les magasins à étages; ceux de la troisième catégorie, à la manœuvre des cabestans, à la mise en mouvement des arbres de transmission, etc.

L'électricité se recommande par la souplesse et le prix peu élevé des conducteurs transportant l'énergie, en même temps que par la supériorité du rendement mécanique comparé à celui de l'eau sous pression. Elle n'expose à aucun aléa pendant les gelées. Les moteurs électriques sont, en revanche, moins simples et moins sûrs.

Enfin l'air comprimé et le gaz n'ont reçu que des applications restreintes.

Qu'ils soient manœuvrés à bras ou mécaniquement, les engins de manutention sont placés à poste fixe sur les quais, mobiles sur rails ou montés sur pontons. Leur puissance varie entre des limites très étendues et va jusqu'à 160 tonnes; en général, les plus forts affectent la forme de bigues ou de mâtures. Beaucoup présentent des dispositions qui permettent de les utiliser à plusieurs puissances différentes et, par suite, de mieux approprier la dépense de force au travail à produire. Une espèce d'appareils fort utile dans des circonstances déterminées est celle des treuils hydrauliques.

Autrefois restreint, l'éclairage des ports a pris un grand développement, grâce à la lumière électrique. Il assure la sécurité des mouvements pendant la nuit et, du moins pour certaines parties des ports, la continuité des opérations d'embarquement ou de débarquement.

Des faisceaux de voies ferrées (voies de manutention, voies de garage, voies de circulation, voies de triage) desservent les quais et les relient aux chemins de fer voisins. Quelquefois, les ports ont pour annexe une véritable gare maritime, munie, au besoin, d'installations spéciales en vue du trafic-voyageurs. Lorsque la situation des lieux s'y prête, les aiguillages doivent être préférés aux plaques tournantes; à

Anvers, les plaques ont été partiellement remplacées par des transbordeurs à manœuvre hydraulique.

La liaison des ports maritimes avec des voies de navigation intérieure constitue un précieux avantage. Dunkerque, Anvers, Rotterdam, Hambourg en ont largement bénéficié. Le matériel fluvial accoste les navires, leur remet ou en reçoit directement les marchandises sans encombrer les quais et, le cas échéant, fournit à peu de frais des magasins flottants.

Pour mettre les marchandises à l'abri des intempéries, il faut édifier des hangars sur les terre-pleins. Ces hangars facilitent d'ailleurs le gardiennage. Il y a avantage à les rapprocher autant que possible de l'arête des quais. La plupart sont clos. On les fait ordinairement discontinus, dans l'intérêt des communications transversales extérieures et aussi de la défense contre l'incendie. Certains d'entre eux comportent un étage, ce qui, avec la manutention mécanique, n'a pas de sérieux inconvénients; la surface disponible est ainsi mieux utilisée. Maintenant, les hangars sont presque exclusivement établis en métal.

Des aménagements particuliers sont créés pour l'embarquement et le débarquement de marchandises telles que les charbons dans les ports où le trafic de ces marchandises a de l'importance. Ils dépendent de la situation des lieux, se différencient selon que le trafic consiste en sorties ou en arrivages, varient au départ avec la nature du charbon et à l'arrivée avec sa destination (consommation locale ou transit). Les wagons contenant le charbon à embarquer sont ordinairement amenés, soit directement, soit au moyen d'élévateurs, à une hauteur suffisante pour se vider automatiquement dans le navire; souvent la puissance hydraulique apporte son concours aux opérations. Quand il s'agit d'arrivages destinés au commerce local, on effectue le débarquement et l'entassement du charbon à l'aide de grues, d'estacades fixes, de ponts roulants, etc. Les installations se simplifient pour le transit.

La manutention des pétroles commande les plus minutieuses précautions. Généralement, les pétroles bruts arrivent en vrac, sont extraits par des pompes et envoyés par des canalisations aux raffineries

voisines ou à des réservoirs en tôle; ces réservoirs se trouvent entourés de murs et l'enceinte est organisée de manière à retenir tout le pétrole en cas de rupture. Les magasins établis pour recevoir le pétrole raffiné en barils doivent être aérés, mis à l'abri d'une chaleur excessive, protégés contre la foudre, munis de puisards où les fuites puissent s'emmagasiner, quelle qu'en soit l'abondance.

Transportées par les navires dans des chambres réfrigérantes, les viandes congelées trouvent à terre des chambres analogues, à la sortie desquelles on les ramène à la température normale par le contact de la vapeur avant de les livrer à la consommation.

Le déchargement des grains en vrac est effectué au moyen de grues, d'élévateurs ou d'aspirateurs. Ces appareils sont fixes ou mobiles. Les élévateurs ont comme organe essentiel une noria. Parfois, la livraison n'a lieu qu'après ventilation, criblage et pesage.

Sur les terre-pleins s'élèvent fréquemment des magasins à étages, pourvus au besoin de caves et desservis par des grues ainsi que par des monte-charge. Ces magasins ont une charpente métallique; des murs de refend diminuent les chances de propagation du feu.

Les grains peuvent être déposés dans des magasins ordinaires. Mais on préfère aujourd'hui les silos, puits verticaux, se remplissant par le haut et se déchargeant par le bas; un changement de silo suffit pour aérer le grain. Les transports horizontaux s'opèrent à l'aide de courroies ou de chaînes à godets et les transports verticaux à l'aide de norias ou de conduites descendantes. D'immenses magasins à grains existent aux États-Unis; la Russie et la Roumanie en possèdent également.

M. Jozon, directeur des routes, de la navigation et des mines, a eu l'obligeance de me remettre des tableaux statistiques d'un haut intérêt, sur le mouvement des ports français et étrangers. Je ne saurais mieux faire que d'en extraire quelques chiffres, pour les reproduire comme conclusion de cette courte étude.

I. PORTS MARITIMES FRANÇAIS.

DÉSIGNATION DES PORTS.	1842.	1850.	1860.	1870.	1880.	1890.	1895.	1900.
	t.	t.	t.	t.	t.	t.	t.	t.
I. TONNAGE DE JAUGE.								
ENTRÉE ET SORTIE ⁽¹⁾ .								
Marseille.....	1,620,705	1,634,491	2,759,652	4,372,687	7,235,174	9,601,110	9,446,196	11,969,602
Le Havre.....	1,281,120	1,121,473	2,068,813	2,820,406	4,518,202	5,625,975	5,368,261	5,297,672
Bordeaux.....	746,767	761,314	1,212,853	1,933,208	3,072,015	3,621,279	3,231,751	3,707,962
Cherbourg.....	122,901	125,364	154,086	455,208	729,537	321,785	721,501	3,627,598
Dunkerque.....	239,592	307,371	561,515	973,515	1,711,896	2,982,203	2,761,535	3,050,404
Boulogne.....	164,971	323,464	416,322	613,940	1,047,539	1,603,854	1,477,465	3,022,585
Rouen.....	754,153	502,733	533,360	450,542	1,456,337	2,016,531	1,778,076	2,539,198
Saint-Nazaire.....	23,156	40,221	135,917	541,322	1,049,611	1,550,409	1,537,408	1,862,866
Cette.....	246,634	292,317	441,402	621,825	1,481,306	1,933,541	1,902,313	1,670,437
Calais.....	190,901	338,369	452,318	659,385	1,116,408	1,205,420	1,100,558	1,633,227
La Rochelle - La Pallice.....	153,793	146,563	182,337	298,725	500,724	666,827	1,224,804	1,290,499
Nantes.....	423,558	509,395	586,405	348,256	333,617	354,062	512,478	1,131,552
Ensemble des ports.	10,495,707	10,828,345	15,799,296	20,745,263	33,691,390	40,983,394	41,205,987	52,099,228

II. POIDS DES MARCHANDISES.

ENTRÉE ⁽²⁾ .								
Marseille.....	"	"	949,946	1,728,827	2,780,626	3,020,899	3,239,704	3,784,385
Le Havre.....	"	"	796,986	1,085,333	1,941,281	1,972,617	2,464,093	2,550,614
Rouen.....	"	"	345,168	299,798	1,048,369	1,481,275	1,384,010	2,346,386
Dunkerque.....	"	"	319,945	576,966	1,116,431	1,888,769	1,607,622	2,028,848
Bordeaux.....	"	"	582,317	828,476	1,436,461	1,609,709	1,321,790	1,772,107
Saint-Nazaire.....	"	"	42,192	264,239	685,028	972,368	931,467	1,397,184
Nantes.....	"	"	344,817	298,416	299,821	276,454	406,048	881,489
Cette.....	"	"	124,895	247,627	828,233	796,231	627,854	616,097
La Rochelle - La Pallice.....	"	"	81,514	137,367	380,258	297,128	451,471	599,185
Dieppe.....	"	"	250,095	315,828	745,666	513,532	351,627	506,129
Bayonne.....	"	"	43,094	47,383	133,943	349,106	406,387	488,479
Boulogne.....	"	"	105,253	209,641	484,734	298,571	255,220	445,092
Caen.....	"	"	128,899	248,159	268,310	316,380	347,673	406,649
Calais.....	"	"	98,641	232,461	396,159	280,037	334,003	369,360
Ensemble des ports.	"	"	6,012,347	8,484,057	13,384,732	17,128,996	16,840,954	21,781,250
SORTIE ⁽³⁾ .								
Marseille.....	"	"	669,548	936,497	1,320,345	1,777,061	2,153,824	2,436,990
Bordeaux.....	"	"	621,977	506,125	692,374	1,025,822	969,952	1,164,775
Le Havre.....	"	"	432,014	635,226	702,753	1,071,605	958,631	1,073,476
Dunkerque.....	"	"	164,304	254,868	900,589	1,313,064	670,915	872,960
Saint-Nazaire.....	"	"	23,953	59,372	114,435	180,768	302,763	358,039
Rouen.....	"	"	95,400	135,488	238,315	299,509	293,138	337,790
Boulogne.....	"	"	24,961	53,462	141,197	252,882	249,670	334,364
Ensemble des ports.	"	"	4,203,629	4,321,949	5,353,235	7,685,501	8,330,364	10,089,756

⁽¹⁾ Les ports dénommés sont ceux dont le tonnage de jauge, entrée et sortie réunies, a dépassé 1 million de tonneaux en 1900.

⁽²⁾ Les ports dénommés sont ceux pour lesquels le poids des marchandises à l'entrée a dépassé 300,000 tonnes en 1900.

⁽³⁾ Les ports dénommés sont ceux pour lesquels le poids des marchandises à la sortie a dépassé 300,000 tonnes en 1900.

DÉSIGNATION DES PORTS.	1842.	1850.	1860.	1870.	1880.	1890.	1895.	1900.
	t.	t.	t.	t.	t.	t.	t.	t.
ENTRÉE ET SORTIE ⁽¹⁾ .								
Marseille.....	"	"	1,619,494	2,665,324	4,100,971	4,797,960	5,393,528	6,221,375
Le Havre.....	"	"	1,229,000	1,720,559	2,644,034	3,044,222	2,808,774	3,459,503
Bordeaux.....	"	"	1,204,294	1,334,601	2,128,835	2,635,531	2,291,742	2,936,882
Dunkerque.....	"	"	484,249	831,634	1,317,020	3,201,833	2,278,537	2,901,808
Rouen.....	"	"	440,568	435,286	1,286,684	1,780,784	1,677,148	2,684,176
Saint-Nazaire.....	"	"	66,145	323,611	799,563	1,153,136	1,234,230	1,755,223
Nantes.....	"	"	613,133	393,628	402,163	393,281	535,331	1,062,570
Cette.....	"	"	274,204	445,240	1,037,813	1,002,942	840,297	832,648
Boulogne.....	"	"	130,214	263,103	625,931	551,453	504,890	779,456
Bayonne.....	"	"	121,784	87,457	196,379	495,386	687,848	760,914
La Rochelle - La Pallice.....	"	"	101,311	169,842	415,508	342,821	516,915	710,737
Dieppe.....	"	"	269,054	377,865	822,354	615,950	460,115	629,959
Calais.....	"	"	113,976	258,009	419,890	348,453	423,828	559,806
Caen.....	"	"	167,311	280,507	316,270	382,636	457,527	552,953
Ensemble des ports.	"	"	10,215,976	12,806,006	20,737,967	24,814,497	25,171,318	31,871,006

⁽¹⁾ Les ports dénommés sont ceux pour lesquels le poids des marchandises, entrée et sortie réunies, a dépassé 500,000 tonnes en 1900.

II. PORTS MARITIMES ALGÉRIENS.

TONNAGE DE JAUGE (ENTRÉE ET SORTIE) ⁽¹⁾.

DÉSIGNATION DES PORTS.	1880.	1890.	1895.	1900.
	t.	t.	t.	t.
Alger.....	1,494,793	2,382,917	2,475,114	2,392,192
Oran.....	1,140,377	1,518,616	1,462,235	1,540,080
Bône.....	1,211,348	1,155,799	1,020,262	1,130,511
Philippeville.....	894,917	1,253,054	865,830	950,998

⁽¹⁾ Les ports dénommés sont ceux dont le tonnage de jauge, entrée et sortie réunies, a dépassé ou à peu près atteint 1 million de tonneaux en 1900.

III. PORTS ÉTRANGERS ET FRANÇAIS.

TONNAGE DE JAUGE DES NAVIRES CHARGÉS À L'ENTRÉE (COMMERCE EXTÉRIEUR) ⁽¹⁾.

DÉSIGNATION DES PORTS.	1870.	1880.	1890.	1895.	1900.	1902.
	t.	t.	t.	t.	t.	t.
Londres (Angleterre).....	4,089,366	5,970,341	7,708,705	8,435,676	9,580,854	10,177,023
Hong-Kong (Chine).....	2,836,436	4,319,217	6,852,588	7,827,398	9,228,762	9,598,629
New-York (États-Unis).....	3,093,186	7,611,282	6,258,222	6,688,595	8,176,761	8,982,767
Hambourg (Allemagne).....	1,389,789	2,766,806	5,202,825	6,254,493	8,037,514	8,689,000

⁽¹⁾ Ce tableau a été prolongé jusqu'en 1902, de manière à comprendre des ports pour lesquels les relevés antérieurs faisaient défaut.

DÉSIGNATION DES PORTS.	1870.	1880.	1890.	1895.	1900.	1902.
	t.	t.	t.	t.	t.	t.
Anvers (Belgique) ⁽¹⁾	1,362,600	3,063,825	4,506,277	5,344,262	6,720,150	8,425,127
Liverpool (Angleterre)	3,416,933	4,913,324	5,784,351	5,598,341	6,001,563	6,843,200
Rotterdam (Pays-Bas)	1,096,348	1,681,650	2,918,425	4,177,478	6,589,091	6,549,233
Shanghai (Chine)	881,604	1,683,610	2,729,292	3,709,900	4,726,441	"
Marseille	1,777,080	2,787,565	3,458,914	3,318,581	4,573,822	4,911,784
Gènes (Italie)	⁽²⁾ 1,392,301	1,495,260	2,612,841	3,394,862	4,117,072	4,325,458
Cape-Town (Cap)	"	"	⁽²⁾ 1,154,020	1,225,316	3,431,215	4,245,602
Lisbonne (Portugal)	320,157	1,396,062	3,291,983	3,454,749	3,612,051	"
Copenhague (Danemark) ⁽³⁾	"	1,327,174	2,208,731	2,095,592	3,202,895	3,344,757
Buenos-Ayres (République Argentine)	"	"	"	"	"	3,303,843
Brème (Allemagne) ⁽²⁾	"	1,109,466	1,733,809	2,189,274	2,494,059	2,984,110
Melbourne (Australie)	"	"	"	"	"	2,827,949
Sydney (Australie)	"	"	"	"	"	2,706,651
Alexandrie (Égypte)	"	"	"	"	"	2,561,252
Barcelone (Espagne)	451,665	1,465,121	2,137,466	3,313,454	2,430,257	"
Bilbao (Espagne)	147,388	"	1,434,623	2,226,326	2,380,114	"
Savannah (États-Unis)	"	"	"	"	"	2,262,053
Le Havre	1,194,189	1,955,991	2,117,332	1,989,633	2,106,659	2,217,606
Trieste (Autriche) ⁽²⁾	960,103	1,111,931	1,471,464	"	2,158,624	2,199,528
Yokohama (Japon)	"	"	"	"	"	2,030,218
Nagasaki (Japon)	"	"	"	"	"	1,974,700
Fiume (Hongrie) ⁽²⁾	210,170	342,643	883,585	"	1,680,917	1,954,541
Philadelphie (États-Unis)	"	1,263,160	1,460,701	"	1,870,754	"
Durban (Natal)	"	"	"	"	"	1,826,526
Amsterdam (Pays-Bas)	405,109	1,076,887	1,484,250	1,749,965	1,812,528	"
Rio-Janeiro (Brésil)	"	"	"	"	"	1,801,880
Göteborg (Suède) ⁽²⁾	"	800,516	1,271,636	1,394,869	1,573,901	"
Montréal (Canada)	"	628,271	930,332	1,069,386	1,393,886	1,539,404
Odesa (Russie)	846,904	1,019,684	1,414,492	1,816,583	1,022,126	1,533,124
Valparaiso (Chili)	"	"	"	"	"	1,386,884
Venise (Italie)	369,182	605,824	1,006,065	1,227,168	1,317,817	"
Cronstadt (Russie)	769,634	1,129,370	940,781	1,272,560	1,539,158	1,300,229
San-Francisco (États-Unis)	393,983	"	"	1,196,660	1,282,004	"
Bombay (Indes anglaises)	"	486,209	751,472	"	1,271,982	"
Vera-Cruz (Mexique)	"	"	"	"	"	1,268,836
Calcutta (Indes anglaises)	"	853,363	961,015	994,240	1,128,537	1,212,622
Dunkerque	399,124	763,388	1,196,859	1,099,727	1,194,476	1,307,714
Ostende (Belgique)	131,128	276,493	810,519	1,013,056	1,112,887	"
Alger	"	538,676	953,401	1,008,698	940,500	1,070,035
Bordeaux	514,437	1,012,880	1,091,097	799,201	1,059,403	1,048,559
Riga (Russie)	537,636	958,078	949,978	1,081,412	1,012,640	"
Tampico (Mexique)	"	"	"	"	"	1,009,001
Christiania (Norvège)	282,988	436,473	869,370	840,490	993,509	"
Stockholm (Suède)	"	371,246	566,333	581,793	792,124	"
Gand (Belgique)	72,809	211,010	427,351	509,317	697,564	"
Québec (Canada)	"	675,634	617,510	579,652	627,451	"

(1) Navires chargés et sur lest.

(2) Cabotage compris.

(3) Y compris les entrées pour compte Brémois de tous les ports du Weser.

2. *Éclairage et balisage des côtes.* — Il faut, pour la sécurité de la navigation maritime, signaler les côtes à grande distance et bien marquer les passes à l'approche des ports : tel est le but de l'éclairage et du balisage.

Jusqu'à une époque récente, le principe était de distribuer le long du littoral des phares principaux à longue portée et à aspects variés, assez nombreux pour que les navigateurs ne pussent atterrir sans en avoir au moins un en vue dans l'état ordinaire de l'atmosphère. Un programme dressé en 1882 d'après ce principe comportait 46 phares électriques formant une sorte de ceinture lumineuse ininterrompue. Mais une étude plus approfondie conduisit à reconnaître que la limitation pratique des routes suivies par les navires permettait une réduction notable du nombre des feux à grande puissance et que, dès lors, il suffirait de 13 phares électriques.

Entre ces phares exceptionnels se répartissent des feux divers de moindre importance. Au 1^{er} janvier 1900, l'état de l'éclairage des côtes de France ne comprenait pas moins de 641 feux.

Autrefois, les feux étaient divisés en cinq ordres, suivant la longueur focale des appareils et les dimensions de la flamme allumée en foyer. Les variations de la puissance lumineuse pour un appareil à éclats d'ordre déterminé selon le nombre des faisceaux, l'emploi éventuel de lampes plus faibles ou plus fortes que ne le suppose l'ordre de l'appareil, l'avènement des feux électriques et celui des feux à incandescence par le gaz riche ou par la vapeur de pétrole ont fait abandonner l'ancienne classification.

On distingue les catégories suivantes de feux, au point de vue de leur caractère : *feux fixes* blancs, rouges, verts ou à secteurs différemment colorés (*feux d'horizon*, éclairant une fraction d'horizon supérieure à 45 degrés, et *feux de direction*, éclairant une fraction d'horizon inférieure à 45 degrés); *feux à occultations* ou à *colorations*, *réguliers* ou *groupés*, dont la lumière est occultée ou la coloration modifiée, soit à des intervalles réguliers, soit à des intervalles inégaux et groupés; *feux à éclats réguliers* ou *groupés*, qui tournent et donnent dans chaque direction une suite de courtes apparitions lumineuses (variante à *éclipses partielles*, obtenue par l'adjonction d'un feu fixe au feu prin-

cipal; *feux à éclats prolongés*; *feux-éclairs*, qui ne sont autres que des feux à éclats d'une durée extrêmement courte); *feux à caractères combinés* ou *mixtes*.

L'appareil d'éclairage d'un phare comprend le foyer lumineux et le système optique concentrant sur l'horizon maritime les rayons lumineux. Vers la fin du XVIII^e siècle, la lampe à double courant d'air d'Argand avec cheminée en cristal avait remplacé l'ancienne lampe à mèche plate sans cheminée. L'illustre Fresnel eut, après Guyton de Morveau, l'idée des lampes à mèches circulaires concentriques; il entreprit avec succès, en 1819, des expériences sur divers becs de cette nature, alimentés d'abord par un réservoir supérieur, puis par un réservoir inférieur; les lampes à réservoir inférieur étaient munies de petites pompes à valvules, que commandait un mécanisme à poids et qu'avait établies l'horloger Wagner. Pendant fort longtemps, l'huile de colza fut seule employée; on la brûlait dans des lampes à une, deux, trois ou quatre mèches, suivant l'ordre du phare, et l'intensité en carrels variait de 1,3 à 23. En 1856, les ingénieurs expérimentèrent l'huile extraite des schistes bitumineux de l'Allier; le résultat satisfaisant des épreuves détermina à introduire l'huile de schiste dans les lampes de quelques fanaux, puis dans toutes les lampes à une mèche. À partir de 1870, les grands phares furent éclairés par la paraffine d'Écosse, huile minérale extraite du boghead, dont le pouvoir éclairant dépassait celui de l'huile de schiste et qui offrait, en outre, l'avantage de n'émettre que des vapeurs non inflammables au-dessous de 60 ou 70 degrés centigrades. Plus tard, les fabricants français arrivèrent à produire des huiles au moins équivalentes par une distillation convenable du pétrole. Le nombre des mèches fut porté jusqu'au maximum de 6. Selon les cas, on se servait de lampes à niveau constant, de lampes à réservoir inférieur dont l'huile montait par simple capillarité, de lampes à mouvement d'horlogerie et à pistons avec clapets métalliques, de lampes à modérateur et à poids intérieur; ces lampes donnaient de 2,2 à 50 carrels.

Entre temps, les machines magnéto-électriques avaient fait leur apparition. L'éclairage à l'électricité put être appliqué en 1863-1865 aux phares de la Hève, à l'aide de la machine créée par Nollet et dite

de l'*Alliance*. À cette machine se sont substitués celle de Meritens, puis des alternateurs bien appropriés à leur destination spéciale. Les essais de courants continus n'ont pas abouti. Des améliorations étaient simultanément apportées aux lampes à arc. Le service des phares prenait les dispositions voulues pour faire varier l'intensité lumineuse d'après la transparence de l'atmosphère. On atteignait des puissances de 3,000,000 becs Carcel et des portées de 50 milles par temps moyen.

Dès 1823, Fresnel avait mis à l'étude les emplois du gaz de houille et du gaz d'huile; la maladie et la mort du savant interrompirent les recherches commencées sous sa direction. L'incandescence avec le manchon Auer a rouvert la question. Depuis quelques années, les ingénieurs ont eu largement recours au gaz d'huile comprimé, ainsi qu'à la vapeur de pétrole également employée sous pression et obtenue en vaporisant l'huile au moyen de la chaleur perdue du brûleur. Ils sont parvenus, de la sorte, à réaliser des puissances lumineuses de 50,000 carcels et des portées de 37 milles. Ce progrès a eu pour conséquence une amélioration considérable des feux d'atterrissage de seconde ligne et de la plupart des feux de direction importants.

En 1783, Teulère avait imaginé les réflecteurs affectant la forme d'un paraboloïde de révolution. C'était l'origine des appareils catoptriques : photophores ou appareils à une seule nappe, engendrés par la révolution d'une parabole autour de son axe; appareils sidéraux à deux nappes, formés par la révolution de la parabole autour de la verticale passant par son foyer.

Fresnel inventa, en 1819, les lentilles à échelons et les appareils dioptriques dérivant de ces lentilles, dont il calcula d'ailleurs les formes de manière à réduire autant que possible l'aberration de sphéricité en même temps que l'épaisseur du verre. Les appareils créés par Fresnel absorbent beaucoup moins de lumière que les réflecteurs de Teulère. Une fois le profil des échelons arrêté, sa révolution autour de l'axe principal passant par le foyer donne une lentille annulaire propre aux feux de direction. Plusieurs lentilles annulaires disposées suivant un prisme à base polygonale, dont l'axe est la verticale de leur foyer commun, constituent un tambour lenticulaire à lentilles annu-

lares, pour feux à éclats avec éclipses totales. La rotation du profil autour de la verticale du foyer fournit une lentille cylindrique convenant aux feux fixes d'horizon. Il est nécessaire de maintenir dans certaines limites l'angle au foyer sous-tendu par les appareils des tambours lenticulaires; afin de ne pas perdre les rayons lumineux émis en dehors de cet angle, Fresnel conçut l'idée de les ramener à l'horizon au moyen d'anneaux catadioptriques agissant par réfraction ou par réflexion totale. Quand un phare ne doit pas éclairer tout l'horizon, l'angle mort est couvert par un réflecteur sphérique qui renvoie les rayons lumineux vers le foyer.

Pendant de longues années, on n'avait pu dépasser 1 m. 84 pour le diamètre intérieur des appareils optiques; le seul moyen de réaliser des puissances exceptionnelles dans les phares à l'huile minérale consistait à associer plusieurs feux, d'où une complication du service, une augmentation de la dépense et un accroissement de la divergence des appareils. Un progrès considérable a été la construction d'appareils hyperradiants d'un diamètre de 2 m. 66. L'Exposition universelle de 1900 a marqué une nouvelle étape avec les feux-éclairs: ici, la durée des éclats est réduite à une valeur très voisine du temps strictement indispensable pour la perception complète de leur intensité lumineuse; les optiques ne comprennent qu'un petit nombre de lentilles à grande surface et, par conséquent, à grande puissance; des méthodes rigoureuses de contrôle assurent la précision focale et restreignent la divergence propre de leurs éléments; des vitesses sans précédent, pouvant ramener à cinq secondes le temps d'une révolution, sont obtenues à l'aide de dispositions mécaniques simples et de légers mouvements d'horlogerie. (L'appareil est équilibré par un flotteur à bain de mercure.)

Une précieuse conquête des dernières années du siècle a été le succès des recherches poursuivies en vue du fonctionnement continu de feux à l'huile minérale, qui restent inaccessibles durant de longs intervalles. Grâce à des mèches spéciales, ces feux se maintiennent plus de trois mois. L'application du flotteur à mercure et l'emploi de quelques piles actionnant un anneau Gramme, entre deux aimants, permettent de leur donner tous les caractères des feux gardés, à occultations ou à éclats.

Parfois, les feux sont installés sur des pontons flottants. Les ingénieurs ont réussi à doter ces pontons des qualités désirables en supprimant tout synchronisme entre leurs oscillations propres et celles des lames, en y adaptant des quilles de roulis à forte saillie, en employant des formes à grand tirant d'eau et en plaçant le lest aussi bas que possible, extérieurement au navire. D'autre part, ils ont substitué aux anciens appareils catoptriques des appareils lenticulaires puissants éclairés à l'incandescence par le gaz; la disposition de ces derniers appareils en fait des pendules composés à oscillations très lentes et les rend presque insensibles au roulis ou au tangage.

Outre les feux permanents à support fixe, il en est à support mobile, les bouées lumineuses alimentées au gaz d'huile, dont le domaine s'est notablement étendu. Ces bouées remplacent certains feux flottants, éclairent des chenaux sinueux et mobiles, complètent les indications des feux d'alignement et des feux à secteurs, signalent les travaux à l'entrée des ports.

Il convient de mentionner encore des observations récentes sur la réfraction atmosphérique nocturne près de l'horizon et sur la sensibilité des alignements de feux.

Le balisage comprend l'ensemble des signaux fixes ou flottants qui servent, de jour, à indiquer les points dangereux ou à jalonner les chenaux : balises, tours-balises, bouées, etc. On doit y joindre les amers classés.

Aux signaux visuels s'ajoutent les signaux sonores employés en temps de brume. Parmi ces signaux, les plus anciens sont les cloches manœuvrées à la main ou mécaniquement; certaines balises, certaines bouées en sont pourvues, et le mouvement résulte alors de l'action automatique des lames. Il existe aussi des bouées à sifflet, dont le fonctionnement est de même déterminé par les vagues. Mais les trompettes à vapeur ou à air comprimé ont seules une portée quelque peu étendue. On s'est d'abord servi de trompettes à anche; aujourd'hui, les sirènes sont préférées. La plupart de nos phares électriques sont pourvus de sirènes, auxquelles leurs machines fournissent l'air comprimé; quelquefois, ils alimentent et comman-

dent électriquement des trompettes placées à une assez grande distance.

Peu de constructions honorent autant les ingénieurs que les édifices des phares. Louis de Foix s'était illustré en érigeant la tour de Cordouan. Il a eu de dignes successeurs au *xix^e* siècle. Au premier rang des maîtres se place Léonce Reynaud, artiste épris de la poésie des flots : sous sa main, le phare surgissant d'un récif, loin d'être le support banal d'un feu, devenait un modèle d'architecture élégante et rationnelle, en même temps que l'évocation saisissante d'efforts surhumains et d'une sécurité définitivement conquise. Le mérite d'un dessin habile et d'une exécution soignée se double souvent de véritables actes d'héroïsme, quand il s'agit, comme à Ar-men, d'occuper un îlot émergeant à peine des vagues toujours en mouvement et d'arracher à la mer quelques jours de répit en une campagne. Parmi les tours de la fin du siècle, deux méritent spécialement d'être citées : celle d'Eckmühl, l'un des plus beaux monuments du genre, et celle de l'île Vierge, qui s'élève à 75 mètres, dépassant ainsi les plus grandes hauteurs jusqu'alors admises.

Les phares doivent offrir une résistance absolue aux ouragans et, le cas échéant, au choc des lames. Ils se font le plus souvent en maçonnerie. La règle ancienne était de n'y employer que des pierres de taille, bien appareillées et vigoureusement reliées entre elles. Depuis, la pratique française a évolué vers les petits matériaux liés par du mortier de ciment : ce système de construction n'a pas seulement pour effet de faciliter les travaux et de procurer une économie ; il transforme l'édifice en un monolithe moins exposé aux désagréments.

Quelquefois, les circonstances obligent à établir les phares en fer ou en acier ; le cas se présente notamment pour les feux qui sont établis dans des colonies dépourvues de ressources ou dont il importe de rendre possible le déplacement ultérieur. Tantôt la charpente est à claire-voie et, s'il y a lieu, fondée au moyen de pieux à vis ; tantôt et plus fréquemment, elle est habillée d'une gaine en tôle. Le rapport sur les travaux publics à l'Exposition de 1900 contient des indications

précises au sujet d'une tour métallique de modèle spécial, celle de Poulo-Canton (Annam).

Poussant à ses extrêmes limites le principe de l'emploi des petits matériaux, les ingénieurs ont récemment fait des tours-balises en béton de ciment et même en ciment immergé à l'état pulvérulent. C'est ainsi que l'écueil de Rochebonne (55 milles au large de La Rochelle) vient de recevoir une tourelle fondée à 8 mètres sous basse mer.

5. Travaux de défense contre les eaux fluviales ou contre les eaux de la mer. — Les défenses de rive des cours d'eau, enrochements isolés ou combinés avec des pieux et palplanches, gazonnements, clayonnages, fascinages, perrés en maçonnerie sèche ou en maçonnerie à mortier, n'appellent ici aucune indication. Il en est autrement des travaux de protection contre le débordement des fleuves ou des rivières. Si les inondations peuvent être un bienfait par les principes fertilisants qu'elles déposent sur le sol, comme dans la vallée du Nil, trop souvent elles constituent un fléau redoutable. Pour les prévenir, divers moyens se présentent naturellement à l'esprit : celui du curage et, au besoin, d'un accroissement de section du lit mineur; celui de l'emmagasinement des eaux vers les sources; celui de l'endiguement du lit majeur.

A peu près exclusivement applicable aux cours d'eau secondaires, le premier moyen ne doit être employé qu'avec une extrême circonspection. D'une part, en effet, il accélère l'écoulement des crues et augmente le danger à l'aval; d'autre part, il risque de dessécher outre mesure les terres de la vallée pendant la période d'étiage et, dès lors, de les stériliser.

L'écoulement des eaux pluviales tombant sur le bassin d'une rivière peut être retardé par des reboisements et des gazonnements. Mais, si efficaces que soient ces opérations agricoles, le procédé le plus parfait d'emmagasinement des crues consiste dans la création de réservoirs, accumulant les eaux surabondantes. Ces réservoirs permettent d'ailleurs d'élever artificiellement le débit aux époques de sécheresse et de fournir ainsi un très utile appoint pour les irrigations ou le fonction-

nement des usines. Toutefois ils ne sont susceptibles d'exercer une influence sérieuse sur les crues qu'à la condition d'offrir une énorme capacité, et, dans la plupart des cas, leur construction exige des dépenses excessives. Seul, un concours de circonstances spéciales est capable de rendre la solution pratique. L'Allemagne, trouvant ces circonstances favorables dans la Haute Silésie, y a récemment entrepris l'aménagement de plusieurs réservoirs.

De temps immémorial et dans tous les pays, on a eu recours à la défense par des digues insubmersibles limitant le lit majeur; le Pô en offre un exemple célèbre. La France a elle-même endigué plusieurs de ses fleuves, la Loire, le Rhône, etc.; elle est armée à cet égard de tout un arsenal législatif, et notamment d'une loi du 28 mai 1858, édictée après les inondations désastreuses de 1856. Cette dernière loi a un double objet : organiser un système d'exécution par l'État des travaux destinés à la protection des villes; parer aux dangers que peuvent engendrer dans certaines vallées les endiguements mal conçus. Peu d'opérations sont aussi délicates et aussi aléatoires que l'établissement des levées insubmersibles, sujettes à des ruptures malheureusement fréquentes. Les catastrophes réitérées subies par les riverains de la Loire ont donné lieu à des discussions ardentes, à des études approfondies, à des propositions variées, sans qu'ait été découvert un remède bien satisfaisant. Parmi les dispositions préconisées, les unes tendent à ouvrir les vals aux crues exceptionnelles par des déversoirs; d'autres, à interrompre les digues de distance en distance et à ne leur demander qu'une préservation contre les changements de lit; quelques-unes, à en régler la crête suivant une pente dépassant celle des eaux en face des vals, à déterminer ainsi le remplissage de ces vals par remous dans le cas de submersion et à éviter des ravinements éventuels; etc. L'accord ne s'est guère établi que sur la défense des centres habités; pour le surplus, des ingénieurs savants et expérimentés conseillent de se résigner aux submersions, sauf à y approprier les cultures.

L'Exposition de 1900 montrait l'importance des travaux poursuivis dans divers pays, spécialement aux États-Unis (bassin du Mississipi), en Hongrie (bassins du Danube et de la Tisza), en Italie (basses vallées du Pô et de l'Adige, Tibre, etc.), dans les Pays-Bas (cours inférieurs

du Rhin et de la Meuse), en vue de défendre par des digues, soit de vastes territoires cultivables, soit de grandes villes telles que Rome, Budapest, Szegedin, etc.

Une conséquence presque forcée de l'endiguement est l'exécution d'ouvrages pour l'irrigation et pour le dessèchement des périmètres protégés.

Des travaux de défense sont aussi exécutés le long de la mer, pour protéger les fonds riverains contre les corrosions, pour assurer la conservation de certaines parties du rivage dont la disparition pourrait compromettre le maintien d'une passe, la sécurité d'un port ou d'une rade, pour conquérir une zone plus ou moins étendue de terrains en la soustrayant à l'invasion des hautes eaux, etc.

L'action destructive à laquelle les falaises rocheuses doivent être mises en état de résister est surtout celle des lames et des galets. On y pourvoit par des revêtements maçonnés et, le cas échéant, par des épis fixant un cordon de galets au pied de la falaise.

Pour les plages meubles, il y a lieu de combattre les lames et les courants, d'établir dans ce but des épis ou des revêtements longitudinaux, souvent de combiner les deux genres d'ouvrages, ainsi que cela a été fait à la pointe de Grave, parfois de créer des digues au large. Les épis, dirigés à peu près normalement au rivage, arrêtent les matériaux en circulation et les emmagasinent; variable suivant les circonstances, leur structure emprunte ses éléments aux fascinages, à la charpente, aux enrochements, à la maçonnerie sèche, à la maçonnerie hourdée de mortier, aux blocs artificiels; dans certains cas, ils sont à claire-voie. Quant aux revêtements longitudinaux, leur système de construction est analogue à celui des épis; ils nécessitent des fondations solides.

Les opérations de conquête sont les plus importantes. Au premier rang se placent les polders. Bien qu'employée souvent dans un sens plus général, la dénomination de polder est spécialement applicable aux terrains conquis, par endiguement et colmatage naturel, sur les mers à marée et sur les fleuves près de leur embouchure. Le colmatage résulte du dépôt des limons que les cours d'eau déversent dans

l'Océan ou qui se forment par l'action incessante des vagues sur les galets et les cailloux provenant de la destruction des falaises. En France, les exploitations principales de polders ont pour siège les baies du Mont-Saint-Michel, des Veys et de Bourgneuf; leur origine est ancienne, mais le *xix^e* siècle les a développées.

Il existe, en arrière du littoral de la Manche et de la mer du Nord, de vastes plaines situées au-dessous du niveau des hautes mers et protégées contre l'invasion des eaux tant par les dunes que par des digues artificielles. Ces plaines, connues sous le nom de *wateringues*, constituent des polders au sens le plus large du mot; on trouve, du reste, l'assimilation faite dans des actes officiels et dans des publications administratives ou autres. La conquête des *wateringues* de France remonte au *x^e* siècle et s'est progressivement étendue; elle comporte surtout des opérations de desséchement. À la même catégorie de terrains appartiennent ceux que protège la digue de l'Aiguillon. Les surfaces endiguées en Angleterre mesurent 700,000 hectares.

6. Travaux édilitaires. — Paris offre la meilleure démonstration des progrès accomplis au cours du *xix^e* siècle dans l'art des travaux d'édilité. Cet art n'a pas seulement un rôle utilitaire; il doit satisfaire aussi largement que possible les légitimes aspirations du public pour tout ce qui est beau, aimable, gracieux, confortable. En échange des lourdes charges qui pèsent sur eux, les habitants des grandes villes ont le droit d'exiger des voies bien construites et soigneusement entretenues, un réseau d'égouts irréprochable au point de vue de l'hygiène, une distribution d'eau abondante et présentant les garanties voulues pour la santé du consommateur, un éclairage qui assure amplement la sécurité et la commodité de la circulation pendant la nuit, une organisation satisfaisante de transports rapides et économiques, le spectacle de la verdure sur les boulevards et les avenues, la jouissance de promenades élégantes et de squares fleuris.

Quelques indications sommaires, mais caractéristiques, suffisent à mettre en lumière le chemin parcouru pour l'amélioration et le développement de la voirie parisienne. À l'origine du siècle, les voies publiques couvraient 618 hectares; la surface des chaussées ne dé-

passait pas 233 hectares; les trottoirs étaient d'ailleurs inconnus. Une notice publiée au *Journal officiel* lors de l'Exposition universelle de 1900 évalue la superficie des rues en 1899 à 1,615 hectares et celle des revêtements à 1,551 hectares, dont 903 hectares de chaussées et 648 hectares de trottoirs. D'après la même notice, la part proportionnelle des diverses natures de chaussées s'éloignerait peu des chiffres suivants : pavage en pierre, 65 p. 100; empierrement, 15 p. 100; asphalte, 4 p. 100; pavage en bois, 16 p. 100. Plus de 60 p. 100 de la surface des trottoirs sont bitumés; le surplus se partage entre le sablage, le revêtement en granit, le pavage, etc.

Pendant les dernières années, la Ville a marqué une tendance à restreindre les pavages en pierre, dont les matériaux coûtent fort cher, et surtout les empierrements, qui, s'ils s'établissent économiquement, sont d'un entretien très onéreux. En même temps, elle développait l'asphaltage et le pavage en bois sur fondation en béton de ciment de Portland. Dans les circonstances actuelles, il y a presque parité dans les frais d'établissement du mètre carré de pavage en pierre, d'asphaltage et de pavage en bois; la dépense d'entretien est un peu moindre pour le pavage en pierre que pour l'asphaltage, plus avantageux lui-même à cet égard que le pavage en bois. La pierre convient spécialement aux rues à lourds charrois et l'asphalte aux voies où le défaut de largeur maintient un état d'humidité permanente; les progrès continus et rapides du bois sont d'autant plus remarquables que son entrée définitive dans le domaine de la pratique ne remonte pas au delà de 1883.

La fondation en béton présente de grands avantages pour l'installation des voies de tramways, fournit à ces voies une assiette fixe et solide, leur permet de résister sans dislocation verticale ni horizontale aux chocs produits par les lourds fardiers. Elle a, en outre, le mérite de protéger le sol contre l'infiltration des eaux de pluie ou d'arrosage, contaminées par les détritiques organiques.

Une partie importante de la tâche du service municipal consiste à assurer le balayage des voies publiques, leur arrosage, l'enlèvement des neiges et des glaces, l'évacuation des ordures ménagères. Le balayage s'effectue tant à bras qu'au moyen de machines, dont les types,

imaginés à Paris, sont maintenant d'un usage général. Destiné soit à fixer la poussière, soit à diluer la boue avant le passage de la machine balayeuse, l'arrosage est fait au tonneau ou à la lance; de ces deux procédés, le second, qui était naguère en faveur, subit un léger recul, dû à ses inconvénients pour la circulation et à l'inégale aptitude des arroseurs; des prises d'eau ménagées dans les bordures de trottoir servent à l'alimentation des tonneaux ou des lances et au lavage des caniveaux, qui a lieu deux fois par jour. Le mode d'enlèvement des neiges varie avec la largeur et la fréquentation des voies; depuis 1880, on recourt au salage pour fluidifier la neige et permettre de la pousser au balai dans les bouches d'égout. Deux opérations accessoires méritent encore d'être citées ici, celles du sablage et du gravillonnage: le sable siliceux entretient la rugosité des chaussées; le gravillon de porphyre ferre les pavages en bois.

Grâce à des mesures sagement coordonnées et rigoureusement appliquées depuis 1884, l'enlèvement des ordures ménagères a lieu avec propreté et sans que le public en soit incommodé. Ces ordures, réunies pour chaque immeuble dans un récipient métallique, sont emportées le matin par des tombereaux collecteurs. Le problème de leur utilisation reste incomplètement résolu: on en répand la plus grande partie sur les terres de la banlieue; une petite part est soumise à un traitement approprié et fournit, après triage et broyage, un engrais de vente facile. Des essais se poursuivent en vue de l'incinération par des procédés analogues à ceux qu'applique la ville de Londres: il en résulterait une réduction considérable du parcours des tombereaux à travers les rues.

Les rues de Paris dont la largeur dépasse 20 mètres reçoivent généralement, sur chaque côté, une rangée d'arbres; à partir de 36 mètres, les rangées deviennent doubles; au delà de 40 mètres, un plateau planté occupe le milieu de la voie. Parmi les essences qui réussissent le mieux figurent le platane, le marronnier, l'orme, le tilleul, l'acacia, le vernis du Japon, le paulownia, les érables, etc. Vers le début de l'année 1900, les plantations des voies publiques parisiennes comptaient plus de 86,000 sujets. La transplantation des gros arbres au chariot, popularisée par l'Exposition universelle de

1878, a mis les ingénieurs municipaux en mesure de réaliser des merveilles.

À la fin du XVIII^e siècle, Paris, malgré ses 3,800 hectares et ses 548,000 habitants, ne possédait que 26 kilomètres d'égouts. Pas plus sous la Restauration que sous le Consulat et l'Empire, la situation ne reçut une amélioration sensible. Il fallut l'apparition du choléra en 1832 pour donner quelque impulsion aux travaux d'assainissement. Mais le véritable progrès date de 1854, époque à laquelle fut arrêté un vaste programme comportant l'évacuation souterraine de toutes les eaux usées, excluant leur envoi à la Seine dans la traversée de la ville et prévoyant le report à grande distance des points de déversement : Belgrand a été le premier artisan de cette transformation. La réalisation et le développement du programme de 1854 ont doté Paris d'un vaste réseau, atteignant, au 31 décembre 1899, 1,512 kilomètres (1,090 kilomètres d'égouts publics et 422 kilomètres de branchements). Une des caractéristiques de nos égouts est qu'on peut les parcourir debout dans toutes leurs parties et que leur ampleur a permis d'y loger 3,000 kilomètres environ de conduites d'eau, 280 kilomètres de conduites d'air comprimé, les tubes de la télégraphie pneumatique, les câbles innombrables des services télégraphiques et téléphoniques. Primitivement limitées aux collecteurs et aux artères principales, les banquettes de circulation ont été généralisées depuis l'adoption du tout à l'égout. Des égouts élémentaires, les eaux passent dans une série de collecteurs qui les conduisent hors de l'enceinte vers le nord-ouest, après avoir franchi par des percées souterraines les coteaux de l'Étoile, de Monceau, des Batignolles; deux siphons voisins des ponts de l'Alma et de la Concorde assurent le passage des eaux de la rive gauche sous la Seine; il n'y a plus de déversements dans le fleuve, à l'intérieur de Paris, que lors des orages d'une violence exceptionnelle. Les collecteurs généraux sont ceux de Clichy, d'Asnières, du Nord, et le collecteur Marceau; ils ont jusqu'à 7 m. 20 d'ouverture.

Les difficultés du curage des égouts ne portent guère que sur les sables. Dans les collecteurs de tous ordres, l'entraînement de ces ma-

tières est obtenu par l'emploi de vannes mobiles, qui s'adaptent à des wagons ou à des bateaux. L'extraction se fait dans des chambres spéciales.

Des appareils de chasse servent à nettoyer les branchements particuliers. C'est A. Durand-Claye qui en a introduit l'usage, et ils se sont rapidement multipliés.

Il y a cent ans, la population parisienne s'alimentait surtout au moyen de l'eau séléniteuse des puits et de l'eau puisée directement dans la Seine; elle pouvait trouver aux fontaines publiques, en nombre restreint, de l'eau provenant des aqueducs du Nord et du Midi ou des pompes de la Samaritaine, du pont Notre-Dame, de Chaillot et du Gros-Caillou. Quelques privilégiés avaient des concessions avec branchements sur les châteaux d'eau. Abstraction faite des puits et des prises directes dans la Seine, les ressources effectives ne dépassaient pas 15 litres par habitant.

Le Consulat et l'Empire entreprirent la dérivation de l'Ourcq et les travaux de l'aqueduc de ceinture, qui devait distribuer dans Paris les eaux de cette dérivation.

Sous la Restauration, aucun progrès marquant ne fut réalisé. Après 1830, Dupuit transforma les machines de la pompe à feu de Chaillot, à laquelle était réservée l'alimentation des quartiers hauts, et construisit, au-dessus de l'ancien village de Chaillot, une cuve de distribution en tôle très remarquée. Diverses fontaines marchandes où s'approvisionnaient les porteurs d'eau furent pourvues d'appareils filtrants; les filtres entrèrent d'ailleurs, comme un élément nécessaire, dans la composition du mobilier des cuisines parisiennes. En 1833, commença le forage du puits artésien de Grenelle, dont l'eau devait jaillir huit ans plus tard d'une profondeur de 548 mètres.

Le nouvel et fécond programme d'Hausmann et de Belgrand avait pour article essentiel le dédoublement de la distribution d'eau en deux services entièrement distincts : service purement domestique ou privé, auquel seraient affectées des eaux de source fraîches et saines; service public, assuré par les eaux de la Seine, de la Marne, de l'Ourcq, des aqueducs du Nord et du Midi, enfin des puits artésiens. Au moment

où commençait l'exécution de ce programme, la question se compliqua par l'annexion à Paris des communes de la banlieue et de leurs 358,000 habitants; un traité dut être conclu avec la Compagnie générale des eaux, concessionnaire du service de la banlieue. Belgrand avait jeté son dévolu sur les sources de la Dhuis et sur celles de la Vanne; les aqueducs de dérivation, étudiés de manière à desservir les quartiers hauts, furent achevés en 1865, pour la Dhuis, et en 1874, pour la Vanne. Les moyens de faire face aux besoins du service public s'accrurent par l'établissement de plusieurs usines : usine à vapeur d'Austerlitz; usine hydraulique de Saint-Maur, renforcée ultérieurement à l'aide de machines à vapeur; usines hydrauliques de Trilbardou et d'Isles-les-Meldeuses, jetant dans le canal de l'Oureq un certain volume d'eau de Marne. Il convient encore de citer, parmi les œuvres de l'époque : le creusement du puits artésien de Passy, pour l'alimentation des lacs du Bois de Boulogne; la création d'usines de relais près du réservoir de Ménilmontant et place de l'Oureq; celle des réservoirs de Passy et de Gentilly; l'installation des fontaines Wallace.

Quand Belgrand mourut (1878), Alphand et ses collaborateurs poursuivirent pieusement la tâche engagée par le savant et habile ingénieur. Au nombre des travaux et des mesures dont Paris leur est redevable se classent : le captage de sources non encore recueillies dans la vallée de la Vanne ou à proximité; les études relatives à l'adduction d'autres sources, le vote de la loi déclarative d'utilité publique pour les sources de l'Avre et l'ouverture des chantiers; la construction de l'usine élévatoire à vapeur d'Ivry, refoulant l'eau de Seine dans le réservoir de Villejuif; l'adjonction à l'usine d'Austerlitz d'une usine également à vapeur, quai de la Rapée; l'établissement d'un réservoir à Grenelle; l'organisation à Trilbardou d'une usine à vapeur de secours; l'augmentation de puissance et la multiplication des relais; l'introduction des compteurs pour le service privé; l'aménagement de nombreuses bouches pour les pompes à vapeur, récemment admises par le régiment des sapeurs-pompiers. Malgré tous ses efforts, Alphand laissa encore Paris insuffisamment doté en eaux de source : chaque année, lorsque la chaleur élevait brusquement la consommation, l'eau de rivière devait être pendant quelques jours employée pour les besoins

domestiques; la substitution s'opérait par voie de roulement entre les divers arrondissements.

De 1891 à 1900, l'Administration municipale a terminé la dérivation de l'Avre, procédé à l'adduction des sources du Loing et du Lunain, établi à Saint-Maur et à Ivry de puissants filtres à sable, installé de nouvelles machines élévatoires à Ivry, Saint-Maur et Montmartre, construit des réservoirs à Passy, Charonne, Montretout.

En définitive, les dérivations de la Dhuis, de la Vanne, de l'Avre, du Loing et du Lunain apportent au service privé, dans les circonstances normales, 290,000 mètres cubes par jour; pendant les sécheresses, ce volume peut descendre à 210,000 mètres cubes; mais, d'autre part, les filtres de Saint-Maur et d'Ivry sont capables de fournir 60,000 mètres cubes d'eau, sinon aussi fraîche, du moins limpide et salubre; l'ensemble des disponibilités du service privé varie donc entre 350,000 et 270,000 mètres cubes, soit 135 à 104 litres par habitant. Pour le service public, le canal de l'Oureq, les usines à vapeur de la Seine, les usines hydrauliques et à vapeur de la Marne, les puits artésiens et les anciens aqueducs donnent théoriquement 537,000 mètres cubes, chiffre que des chômages partiels ramènent à 520,000 mètres cubes, ou 200 litres par habitant. Les eaux du service privé ont une pression qui leur permet d'atteindre constamment les étages les plus élevés; celles du service public, au contraire, n'arrivent à ces étages que dans certains quartiers et à certaines heures, et l'insuffisance ou le défaut de permanence de leur pression impose l'usage d'eaux de source pour des besoins domestiques auxquels suffiraient les eaux de rivière : il y a là une situation sur les inconvénients de laquelle l'attention des autorités compétentes est depuis longtemps appelée.

La constitution progressive de l'outillage si complexe, par lequel la capitale reçoit l'eau qui lui est nécessaire, a donné lieu à des travaux remarquables. En ce qui concerne le service privé, la première place appartient aux longs aqueducs de dérivation des sources et aux usines élévatoires annexes : aqueduc de la Dhuis (131 kilomètres), aboutissant au réservoir de Ménilmontant; aqueduc de la Vanne (173 kilomètres), aboutissant au réservoir de Montsouris, et usines hydrauliques ou

mixtes de Chigy, Laforge, Malay-le-Roi, Maillot; aqueduc de l'Avre (102 kilomètres), aboutissant au réservoir de Montretout; aqueduc du Loing et du Lunain (90 kilomètres), aboutissant au réservoir de Montsouris, et usines élévatoires, notamment usine à vapeur de Sorques. Après les adductions de source viennent les grands établissements de filtrage construits à Saint-Maur et à Ivry : l'eau y passe d'abord par des canaux dégraisseurs ou par un premier filtre à trois couches de cailloux, puis filtre à travers des couches de sable, de gravier et de cailloux ayant ensemble une épaisseur de 1 mètre; des pompes à vapeur amènent l'eau dans les bassins de filtrage et la refoulent ensuite dans le réseau de distribution du service privé. Trois usines de relais effectuent les relèvements d'eaux de source indispensables pour quelques parties de la capitale. En ce qui concerne le service public, un rôle important est encore réservé au canal de l'Ouereq (97 kilomètres), dérivation alimentaire et voie navigable : il comporte deux usines annexes, l'usine mixte de Trilbardou et l'usine hydraulique d'Isles-les-Meldeuses, a pour terminus le bassin de la Villette et alimente, malgré sa faible pression, la plupart des fontaines monumentales du centre de Paris. Les usines à vapeur puisant en Seine desservent respectivement : celle d'Ivry, les réservoirs de Villejuif et de Charonne; celle d'Austerlitz, les réservoirs de Gentilly et de Charonne, ainsi qu'une cuve à Villejuif; celle de Bercy, la bêche Saint-Pierre au pied de la butte Montmartre, les réservoirs de Charonne et de Passy; celle de Chaillot⁽¹⁾, le réservoir de Passy; celle de Javel, le réservoir de Grenelle. Quant à l'usine mixte de Saint-Maur, elle refoule les eaux de la Marne dans le lac de Gravelle et le réservoir de Ménilmontant. Quatre usines de relais assurent des relèvements d'eau, comme pour le service privé. Les puits artésiens n'ont eu qu'une célébrité éphémère; celui de Grenelle est en démolition. Un intérêt d'histoire plus que d'actualité s'attache aux anciens aqueducs du Midi et du Nord, particulièrement au dernier. Dans l'ensemble, les vingt et un réservoirs présentent une capacité supérieure à 800,000 mètres cubes; lorsque des bassins affectés aux deux services se trouvent superposés,

⁽¹⁾ Actuellement transférée à Auteuil.

c'est toujours l'étage haut qui correspond au service privé, de manière à rendre impossibles les apports d'eau de rivière par déversement. Les conduites dessinent deux réseaux maillés, ayant ensemble une longueur voisine de 2,600 kilomètres; sauf exception, leur diamètre varie entre 0 m. 054 et 1 m. 10; elles sont en fonte, du système à bague, et prennent place dans les égouts. À la fin de 1899, on ne comptait pas moins de 90,000 prises pour abonnements.

Peu de villes sont mieux dotées, possèdent un système d'alimentation mieux conçu que le Paris contemporain. L'adduction des eaux de source a constitué un immense bienfait, spécialement par l'énorme réduction des atteintes de la fièvre typhoïde.

Si le développement du réseau d'égouts avait puissamment contribué à l'assainissement intérieur de Paris, la vallée de la Seine était moins heureuse, car le déversement journalier d'un énorme volume d'eaux souillées contaminait le fleuve jusqu'à Mantes. Dès 1864, Mille acquit, au cours de missions à l'étranger, la conviction que l'épandage des eaux d'égout et leur épuration par un sol perméable pourraient seuls fournir la solution pratique du problème. À la suite de polémiques ardentes, un essai fut tenté en 1869 dans la plaine de Gennevilliers et donna des résultats très encourageants. Les ingénieurs municipaux et notamment Alfred Durand-Claye, véritable apôtre, poursuivirent l'expérience avec d'autant plus de sollicitude que déjà les égouts servaient d'émissaires non seulement aux eaux pluviales, ménagères ou d'arrosage, mais encore aux eaux vannes provenant des tinettes filtrantes, et que le tout à l'égout paraissait devoir s'imposer dans un avenir assez prochain. Une loi du 4 avril 1889 consacra le double principe de l'écoulement direct des vidanges à l'égout et de l'épandage agricole, en autorisant la Ville à créer le parc d'Achères sur 800 hectares de terres domaniales détachées de la forêt de Saint-Germain. Enfin le tout à l'égout fut rendu obligatoire par la loi du 10 juillet 1894. Cette transformation du rôle des égouts n'était possible, à peine y a-t-il lieu de le faire remarquer, que grâce aux accroissements successifs des ressources d'alimentation en eau.

Au commencement de 1900, l'économie générale du système

d'épandage était le suivant. Les eaux amenées par le collecteur du Nord se rendaient, sous l'action de la gravité, dans la plaine de Gennevilliers. Toutes les autres eaux, dirigées sur Clichy, y subissaient un premier refoulement, partie vers Gennevilliers, partie vers Colombes; le volume envoyé en ce dernier point était porté par un second refoulement à l'origine d'un aqueduc libre, qui s'étendait jusqu'au delà des Mureaux. L'émissaire général de Clichy à Triel domine près de 8,000 hectares. Une petite usine supplémentaire a été installée à Pierrelaye.

Ce n'est point ici le lieu d'insister sur les procédés d'éclairage, dont l'histoire et la description trouvent plus naturellement leur place dans des chapitres spéciaux. Néanmoins quelques indications sommaires sont indispensables au sujet de l'éclairage public parisien.

La plupart des rues de Paris ont un éclairage plus ou moins intensif au gaz. Tous les appareils sont branchés sur une canalisation générale, dont la longueur au 1^{er} janvier 1900 dépassait 1,620 kilomètres. Vers la même époque, la consommation municipale annuelle était de 43 millions de mètres cubes environ; l'éclairage public et l'éclairage privé réunis consommaient plus de 300 millions de mètres cubes. Le nombre des brûleurs en service sur la voie publique atteignait 55,420 (50,110 papillons; 3,309 becs à récupération de chaleur; 1,840 becs Auer; 110 becs Denayrouze et Saint-Paul; 51 becs intensifs à air froid).

Abstraction faite de tentatives presque aussitôt abandonnées, l'éclairage électrique de la voie publique n'a débuté à Paris qu'en 1881, place du Carrousel; il fut appliqué, l'année suivante, au parc Monceau, puis, en 1884, au parc des Buttes-Chaumont. En 1899, le nombre des foyers électriques était passé à un millier; ces foyers, généralement constitués par des lampes à arc de 10, 12 ou 14 ampères, se répartissaient entre 45 rues, 17 places et 8 squares, non compris les parcs Monceau et des Buttes-Chaumont.

Les moyens de transport en commun n'ont cessé de se développer à Paris. Des omnibus, des tramways à traction animale ou mécanique

sillonnent la capitale et concourent, avec le chemin de fer de ceinture, les bateaux à vapeur et le chemin de fer métropolitain, à assurer une circulation d'exceptionnelle intensité.

Sans consacrer ici à ces instruments de transport des indications qui ont leur place marquée dans une autre partie du même chapitre, je me borne à rappeler qu'en 1900 ils ont desservi un mouvement de 520 millions de voyageurs. Cependant le métropolitain n'a été que partiellement et tardivement ouvert à l'exploitation.

Partout, des besoins analogues ont déterminé des opérations édilitaires plus ou moins semblables à celles qui viennent d'être sommairement rappelées pour Paris.

C'est peut-être au point de vue de l'alimentation en eau potable que le progrès et le retour à l'ancienne tradition romaine sont le plus frappants. La sollicitude des administrations municipales s'est, d'ailleurs, portée non seulement vers l'augmentation du volume mis à la disposition des habitants, mais aussi vers l'admission exclusive d'eaux pures, salubres, exemptes de germes infectieux : grâce aux sages mesures prises dans cette voie, la mortalité de certaines villes a subi une décroissance surprenante. Peu de problèmes se posent sous des aspects d'une telle variété. Cependant deux solutions types se dégagent : l'une consiste à capter soigneusement des eaux de source, souvent fort loin de la ville, et à les amener dans des réservoirs dominant les quartiers les plus élevés ; l'autre, à prendre des eaux de rivière, à les purifier au moyen de filtres naturels, de filtres artificiels ou d'appareils divers de stérilisation, et à les refouler mécaniquement jusqu'au niveau voulu. Les grosses agglomérations sont contraintes de chercher leurs ressources à des distances sans cesse croissantes : en 1900, New-York avait des projets s'étendant à 1,000 kilomètres⁽¹⁾.

⁽¹⁾ D'après un tableau dressé par M. Imbeaux, ingénieur des ponts et chaussées, et par M. Thiéry, conducteur, le volume d'eau disponible par jour et par tête était le suivant, vers la fin du siècle, dans les villes de France comptant plus de 50,000 habitants : Grenoble,

1,032 litres ; Nice, 955 ; Besançon, 495 ; Nancy, 351 ; Montpellier, 332 ; Calais, 282 ; Troyes, 294 ; Toulouse, 265 ; Lille, 256 ; Versailles, 253 ; Roubaix-Tourcoing, 221 ; Clermont-Ferrand, 214 ; Saint-Étienne, 207 ; Tours, 205 ; Béziers, 201 ; Reims, 198 ;

Les eaux usées sont tantôt entraînées avec les eaux de pluie dans des égouts à grande section, tantôt refoulées dans des conduites forcées. Une tendance générale se manifeste en faveur du tout à l'égout. L'évacuation a lieu soit à la mer, soit dans un fleuve à fort débit, soit sur des champs d'épandage comme à Paris et à Berlin.

Des perfectionnements continus ont permis à l'éclairage public au gaz de conserver en grande partie ses positions malgré les assauts de l'éclairage électrique. Ce dernier éclairage devait prévaloir et a prévalu dans les régions où des chutes d'eau puissantes en rendaient la production économique, surtout quand il était possible de le combiner avec une distribution de force.

Après s'être d'abord développés aux États-Unis, les tramways urbains ont également pris un vif essor en Europe; la traction mécanique élimine progressivement la traction animale, et c'est le plus souvent l'électricité qui fournit l'énergie nécessaire. Dans les grandes villes, des métropolitains aériens ou souterrains sont venus répondre aux exigences, chaque jour croissantes, d'intensité de trafic et de rapidité.

7. Télégraphie pneumatique. — Le principe de la télégraphie pneumatique est très simple. Entre les deux bureaux qui doivent être mis en relation court une ligne de tuyaux bien calibrés et parfaitement étanches. Dans ces tuyaux glisse une boîte contenant les télégrammes

Rennes, 196; Rouen, 193; Dijon, 190; Lyon, 188; Nîmes, 179; Le Mans, 179; Bordeaux, 175; Toulon, 152; Angers, 144; Saint-Quentin, 140; Le Havre, 119; Orléans, 116; Nantes, 115; Limoges, 113; Amiens, 91; Brest, 27. Le canal alimentant Marseille avait une portée de 10 à 14 mètres cubes par seconde, pour une population totale de 491,000 habitants et une population agglomérée de 396,000 habitants. Alger disposait de 59 litres, Oran de 148, Tunis de 92.

Voici d'autre part, à titre d'exemples, les chiffres relatifs à un certain nombre de grandes villes étrangères : 1° Europe. — Rome, plus de 1,000 litres; Glasgow, 254; Budapest,

250; Hambourg, 240; Naples, 200; Édimbouurg, 183,5; Londres, 183 à 136 suivant les quartiers; Newcastle, 172; Liverpool, 142; Manchester, 132; Birmingham, 127; Venise, 90; Berlin, 80; Vienne, 70 et bientôt 220. 2° Amérique. — Buffalo, 1,026; Washington, 757; Philadelphie, 613; Détroit, 575; Cleveland, 537,5; Chicago, 526; Cincinnati, 511; Baltimore, 424; Milwaukee, 382; New-York et Brooklyn, 492 à 318; Boston, 378,5; Saint-Louis, 371; San-Francisco, 238,5; Providence, 215,7; New-Orléans, 133; Québec, 643; Toronto, 378,5; Montréal, 314; Buenos-Ayres, 200.

et mise en mouvement soit par l'action de l'air comprimé à l'arrière, soit par celle de l'air raréfié à l'avant, soit (et c'est le cas général) par la combinaison des deux moyens.

Pour desservir plus de deux bureaux, on peut tracer les conduites dans le système rayonnant, c'est-à-dire leur donner pour origine commune un seul bureau tête de ligne, ou adopter le système polygonal, ou appliquer concurremment les deux systèmes. Le tracé polygonal allonge le parcours des correspondances, mais permet de diminuer l'intervalle entre deux envois consécutifs et se prête facilement aux extensions. Il exige des dépenses tantôt supérieures, tantôt inférieures à celles du système rayonnant, suivant la position relative des points à desservir.

Commencé en 1867, neuf ans après celui de Londres et en même temps que celui de Berlin, le réseau pneumatique de Paris s'est développé rapidement. En 1886, toute la capitale était desservie. La longueur des canalisations atteint 290 kilomètres, y compris les conduites reliant les bureaux aux centres de production de la force. Adopté au début, le système polygonal a été maintenu; toutefois les bureaux principaux ont dû être réunis par des jonctions directes. Le nombre des bureaux desservis est de 110 et celui des appareils de 391.

Les canalisations du réseau se composent de tuyaux en fer forgé, soudés à recouvrement et pourvus de joints à brides. Elles sont placées dans les égouts et reposent sur des supports en fer galvanisé. Le diamètre des tubes est de 65, 80 ou 100 millimètres, suivant leur affectation. Pour les conduites d'air entre les ateliers de production de la force motrice et les bureaux de têtes de ligne, on emploie des tuyaux en fonte d'un diamètre de 65 à 300 millimètres, analogues à ceux des conduites d'eau.

Il existe deux catégories de boîtes : les boîtes-pistons, munies d'une collerette de cuir embouti; les boîtes ordinaires, poussées par les premières et simplement insérées dans des étuis en cuir.

Les bureaux têtes de réseau disposent seuls de la force et ont des appareils permettant de mettre à volonté sur la ligne la pression ou le vide. Quant aux bureaux intermédiaires, qui ne peuvent rien faire par eux-mêmes, ils sont pourvus d'appareils laissant la colonne d'air con-

tinuer son chemin ou d'appareils donnant le moyen de la mettre en communication avec l'atmosphère, si les sections suivantes, dans le sens du circuit, fonctionnent par le vide. L'introduction et la réception des boîtes se font par des chambres avec portes à fermeture hermétique; des robinets et des valves servent aux manœuvres d'air et aux sasements.

Généralement, les trains sont espacés de cinq minutes. En principe, une même section ne doit pas être parcourue par deux trains à la fois, mais cette règle souffre des exceptions, par exemple sur les lignes directes où l'intervalle est réduit à 3 minutes et qui livrent simultanément passage à deux ou même trois trains. Les installations ont été étudiées en vue d'une vitesse moyenne de circulation de 400 mètres à la minute; entre deux bureaux de Paris placés dans les conditions les plus défavorables, le délai de transport et de transbordement des boîtes peut ne pas dépasser 40 minutes.

Les ateliers de force motrice comportent des machines à vapeur et des pompes à air ou des compresseurs de divers types. Dans l'ensemble, les machines ont une puissance de 620 chevaux.

En dehors de Paris, le service pneumatique est limité aux deux villes de Lyon et Marseille.

8. Charpente métallique des édifices. — L'une des premières applications du fer à la charpente des édifices a été faite au Théâtre-Français, vers la fin du XVIII^e siècle, époque à laquelle les combles de ce théâtre furent établis en fer forgé. Mais les dépenses atteignirent un tel chiffre qu'en 1809, quand il fallut reconstruire la coupole de la Halle au blé, détruite par un incendie, on eut recours à la fonte : les voussoirs des fermes de cette coupole, dont le diamètre était de 40 mètres, furent fondus dans les établissements du Creusot, à Montcenis.

En dehors de ces travaux d'un caractère tout à fait exceptionnel, le bois continuait à être l'élément presque exclusif des charpentes.

Néanmoins l'appauvrissement des forêts, le renchérissement des bois, la difficulté de se procurer des pièces d'un fort équarrissage, l'augmentation incessante des espaces à couvrir avec un nombre d'appuis aussi restreint que possible, la multiplication des grands

édifices pour la vie publique ou privée, tout devait pousser les ingénieurs à poursuivre leurs recherches et leurs études relatives à l'utilisation du métal.

Polonceau, alors ingénieur au chemin de fer de Versailles (rive gauche), imagina en 1837 un nouveau système de fermes, qui mariait le bois, la fonte et le fer : les arbalétriers en bois étaient soutenus, au milieu de leur longueur ou même sur plusieurs points, par des bielles en fonte que bandaient des tirants et entrants en fer. Des arbalétriers en fer à double τ remplacèrent plus tard les arbalétriers en bois ; une substitution analogue eut lieu pour les pannes. Le système Polonceau amena une véritable révolution dans l'établissement des combles, dont la portée put recevoir un accroissement considérable. Parmi ses innombrables applications, il est juste de citer, comme l'un des plus beaux exemples, les grandes fermes de 40 mètres construites par Flachet à la gare Saint-Lazare.

Lors de l'Exposition de 1849, le jury récompensa par une médaille d'or M. Travers, auteur du comble en fer de la halle de la douane à Paris : ce comble, de 36 mètres de portée, faisait d'autant plus d'honneur à l'architecte que les usines métallurgiques n'exécutaient pas encore de fers laminés à double τ pour les constructions civiles.

En 1851, Baltard construisait les Halles centrales de Paris, entièrement métalliques, et inaugurait ainsi un nouveau type d'architecture, qui ne tarda pas à être imité dans un grand nombre de villes de la France et de l'étranger.

Peu de temps après, on admirait, dans la grande nef du Palais de l'Industrie, édifiée sur les plans et sous la direction de Barrault, le premier modèle de ferme en arc métallique à grande portée. Les profanes, aussi bien que les ingénieurs et les architectes, furent unanimes à apprécier le mérite de la nef centrale, dont le comble en plein cintre, de près de 50 mètres d'ouverture et 35 mètres de hauteur au-dessus du sol, était solidement contre-buté par les deux nefs latérales et débarrassé de toute armature au-dessous de l'intrados. Bien que les pièces laminées et rivées entrassent pour une part importante dans l'ossature de ce comble, le travail de forge, notamment dans les assemblages, y jouait encore un rôle capital.

Dès après 1855, les constructeurs redoublèrent d'efforts pour simplifier le profil des pièces et surtout leurs assemblages, pour éviter ou tout au moins pour circonscrire dans d'étroites limites l'emploi des pièces de forge, pour diminuer le nombre des soudures. Ils cherchèrent de plus en plus à confiner la fonte dans les parties purement décoratives de la construction, et spécialement à la remplacer par le fer dans les appuis supportant les combles élevés; cette substitution, en même temps qu'elle pouvait apporter une certaine économie, avait le mérite de faciliter la liaison des appuis avec les pièces de la couverture, de fournir une rigidité irréalisable avec la fonte sans des dispositions compliquées et coûteuses, de mieux assurer la résistance aux vibrations engendrées par les tempêtes. Peu à peu, d'ailleurs, les pièces de fer prenaient l'avantage au point de vue de la rapidité de fabrication. Enfin elles n'exigeaient pas les mêmes précautions dans le chargement, le déchargement et les manutentions de toute nature qui précèdent le montage.

On vit aussi se manifester, d'abord timidement, puis avec hardiesse, une tendance à réduire l'importance des tirants et autres pièces à tendeurs, même dans les fermes surbaissées, et cela d'autant plus que la portée des fermes était plus grande. C'est qu'en effet les tirants et pièces du même genre nécessitent souvent un forgeage onéreux, exigent pour les assemblages un travail mécanique très soigné, comportent des soudures délicates et n'offrent jamais une sécurité absolue; il est impossible de connaître avec précision leur état réel de tension, l'étendue des efforts qui s'y développent, les variations de ces efforts sous l'influence des changements de température. Les bielles, tirants et entrails ont, en outre, l'inconvénient d'encombrer la partie haute des édifices.

D'autre part, le système des articulations à la clef et aux naissances, depuis longtemps usité pour les ponts, s'étendait aux fermes en arc des édifices. Ce dispositif donnait une base sûre aux calculs, rendait la répartition des efforts intérieurs mathématiquement certaine dans toutes les hypothèses de surcharge et de variation de température, et permettait une distribution rationnelle du métal.

Les progrès accomplis avant 1889 s'étaient manifestés dans la ga-

lerie du travail à l'Exposition de 1867 (comble en arc de 34 mètres d'ouverture), dans le hall des machines à l'Exposition de 1878 (35 mètres) et dans un certain nombre d'édifices importants construits à l'étranger, notamment en Angleterre et en Allemagne. Parmi ces derniers édifices, l'un des plus remarquables, la gare de Saint-Pancrace à Londres, n'avait pas moins de 73 m. 15 d'ouverture.

Dépassant par un prodigieux effort tous leurs devanciers, les organisateurs de l'Exposition universelle de 1889 présentèrent au monde émerveillé deux chefs-d'œuvre de construction métallique : le palais des Machines, avec ses fermes en ogive surbaissée et à trois articulations, d'une portée de 110 m. 60 entre les axes des rotules inférieures ; la tour de 300 mètres. Ils acquirent un autre titre, peut-être plus grand encore, à la reconnaissance publique, en faisant définitivement justice du préjugé qui consistait à regarder l'emploi du fer en grandes masses comme incompatible avec la beauté décorative.

La tour Eiffel, le palais des Machines et les deux palais des Arts mettaient en lumière, par des spécimens particulièrement heureux, les diverses manières dont peut être comprise l'étude des charpentes métalliques. Pour la tour, le constructeur avait attribué au calcul un rôle sinon exclusif, du moins tout à fait prépondérant, sauf à orner après coup certaines parties au moyen d'une décoration rapportée : ce système ne convient qu'à des édifices exceptionnels, où les détails disparaissent devant l'ensemble, où l'œil passe sur les lignes secondaires et s'arrête seulement aux lignes maîtresses, où le sentiment du beau est produit par la pureté des tracés, par la grandeur de l'œuvre, par la difficulté vaincue ; les motifs de décoration exigent une extrême sobriété sous peine de choquer le regard comme la raison. L'architecte du palais des Machines s'était attaché à unir l'esthétique et le calcul dans l'étude des ensembles et des détails, à marier les convenances de la forme aux nécessités de la résistance, à rechercher une décoration sobre et élégante dans la mise en œuvre des matériaux eux-mêmes ; après avoir vu l'œuvre, les plus sceptiques devaient reconnaître l'inanité de leurs préventions, constater l'infinie variété des ressources que les éléments fournis par l'industrie sidérurgique et la composition de ces éléments offrent à l'art appuyé sur le

calcul. Enfin les palais des Arts, tout en accusant les lignes principales de l'ossature, combinaient les formes du métal avec celles d'autres matières, telles que terres cuites, faïences, briques, staff, etc., moins froides et plus faciles à modeler : cette association avait engendré des effets et des jeux de couleurs remarquables.

En 1900, la grande innovation a été l'emploi presque exclusif de l'acier laminé, que les progrès de la métallurgie et des travaux d'atelier permettaient de produire, puis d'ouvrer dans des conditions inspirant toute sécurité; les charpentes devenaient ainsi plus légères et moins coûteuses. Sans viser au gigantesque comme la tour de 300 mètres et la galerie des Machines de 1889, les palais de l'Exposition universelle de 1900 n'en ont pas moins exigé des ossatures de dimensions considérables : celle du grand palais des Champs-Élysées, établie à titre définitif, est certainement, dans son ensemble, l'une des plus belles et des plus intéressantes du monde. Le dôme de ce palais, avec ses fermes diagonales de 67 mètres d'ouverture et son relief de 64 mètres sur l'avenue Alexandre III, constitue un véritable modèle auquel s'allient dignement la nef longitudinale, la nef transversale et leurs croupes. Traitant la décoration au moyen des matériaux mêmes de la construction et tenant à exclure d'une manière absolue les motifs rapportés, l'architecte s'est borné à ajourer ou à découper les tôles, à chantourner ou à courber en volutes les cornières ou fers spéciaux; il a, de la sorte, réalisé une parfaite unité décorative.

§ 3. CARROSSERIE ET CHARRONNAGE.

SELLERIE ET BOURRELLERIE. CYCLES. AUTOMOBILES.

1. **Carrosserie et charronnage.** — Au début du xix^e siècle, la carrosserie vivait des traditions du passé. La caractéristique ordinaire des voitures de cérémonie ou de voyage était le montage à flèche, avec ressorts en C et soupentes en cuir. Cependant des progrès importants commençaient à se manifester en Angleterre : Obadiah Elliott, carrossier à Lambeth, adoptait pour la suspension des ressorts elliptiques dits à *pincettes*, qui reliaient directement les essieux à la caisse et supprimaient le train, au grand profit de la légèreté et de la simplicité des véhicules ; Windus imaginait bientôt le huit-ressorts, l'essieu à graisse était remplacé par l'essieu à huile, beaucoup plus propre et plus facile à entretenir ; Samuel Hobson diminuait les roues et abaissait la caisse dans la mesure voulue pour qu'il fût possible de substituer un double marchepied à l'ancienne échelle à trois degrés.

Les Anglais se passionnèrent pour la briska, le stanhope à deux roues et doubles ressorts, le tilbury, le dog-cart, le tandem, le suicide (où le groom était assis à 3 pieds au-dessus du conducteur), le panier, la droschka, le mylord (devenu plus tard la victoria), la wagonnette (voiture commode et légère dans laquelle on roulait de côté), le brougham (variété du coupé), la clarence (coupé de famille), le mail-coach (où les maîtres occupaient alternativement avec les domestiques l'extérieur ou l'intérieur, selon les variations du temps). Tous ces types de voitures émigrèrent plus ou moins hors de la Grande-Bretagne ; les autres pays, et particulièrement la France, traversèrent une période de véritable anglomanie, justifiée du reste jusqu'à un certain point par l'habileté des carrossiers anglais.

A Paris, les fiacres restèrent d'abord ce qu'ils avaient été au xviii^e siècle, sales, délabrés, attelés de chevaux détestables ; presque toutes les voitures de place (citadines ou urbaines) étaient d'anciennes voitures particulières réformées. Mais, après la Révolution de 1830, parurent les mylords à un cheval, propres, commodes et d'une rapidité suffisante.

Depuis plus d'un siècle et demi, les carrosses à cinq sous du règne de Louis XIV avaient cessé leur service éphémère, quand ils ressuscitèrent sous Charles X, en 1828; on les désigna du nom d'omnibus. Ils étaient cette fois accessibles à tous les voyageurs, sans les exclusions antidémocratiques de 1662. Le prix des places ne tarda pas à être relevé de 0 fr. 05, ce qui le porta à 0 fr. 30. Vers 1850, les lignes d'omnibus, déjà nombreuses, contribuaient puissamment à faciliter les communications entre les divers quartiers de Paris; le système des correspondances fonctionnait et s'étendait même à certains points de la banlieue, moyennant une très légère augmentation de prix. Cependant nous étions dans une situation inférieure à celle de Londres, où le service des omnibus, organisé en 1822, avait pris une extension plus grande et plus rapide.

Les transports en commun à longue distance s'étaient améliorés avec la mise en circulation des grandes diligences jaunes de la rue Notre-Dame-des-Victoires, qui rayonnaient de Paris sur toute la superficie de la France et correspondaient avec différentes lignes de voitures à l'étranger.

Aux grotesques paniers à salade de la poste succédèrent, en 1819, les élégantes, mais lourdes *malles-postes coupés jaunes*, sortes de cabriolets que l'on fermait à volonté sur le devant du coupé et qui comprenaient 4 places, dont 3 à l'intérieur et une quatrième dans le compartiment du courrier. En 1840, les malles couleur puce remplacèrent les coupés jaunes de la Restauration : il y avait 25 berlines et 400 briskas.

Insensiblement disparaissait le postillon classique. Plus de queue, de tresses, de perruque poudrée; plus de jaquette bleue à revers, collet et retroussis écarlates, avec quelques douzaines de boutons en étain aux armes de France; plus de culotte de peau jaune ou verte; plus de grosses bottes à pompe, ni de chapeau ciré à ballon et à larges bords retroussés au-dessus des oreilles. Le costume des cochers de diligences ou de malles-postes devenait prosaïque et souvent négligé. Mais le cocher, assis sur le siège de sa voiture, était mieux placé pour conduire à grandes guides quatre ou cinq chevaux fringants du pays chartrain.

Les anciens carrosses ou coches du ^{xviii}^e siècle pour Versailles, Saint-Germain-en-Laye et autres villes de la banlieue de Paris faisaient place aux *gondoles* à 18 voyageurs (3 dans le coupé, 6 à l'intérieur, 6 dans la rotonde et 3 sur l'impériale).

Comment ne pas donner encore un souvenir au *coucou* de célèbre mémoire? Sa boîte jaune, verte, brune, rouge ou bleu de ciel, ouverte par devant et munie latéralement d'un ou de deux carreaux, présentait deux mauvaises banquettes destinées à six voyageurs. Quand l'intérieur était garni, on rabattait à l'avant un tablier avec banquette, sur lequel prenaient place le cocher et deux voyageurs lapins. Dans les grandes circonstances, deux ou trois voyageurs montaient encore sur l'impériale; on les désignait du sobriquet de singes. Quelques enfants tenus sur les genoux complétaient une cargaison des plus respectables, confiée aux soins d'un cheval étique et décrépît, qui recevait par ironie le nom de vigoureux. La voiture avait conservé les vieilles soupentes, avec un brancard massif fixé sur un essieu autour duquel tournaient deux grandes roues. Paris avait des coucous pour Sèvres, Versailles, Neuilly, Saint-Germain, Saint-Denis, Enghien, Montmorency, Sceaux, etc. Les voyageurs en sortaient couverts de poussière, froissés, roués, et cependant ils s'estimaient heureux d'y trouver place, quand ils avaient manqué la gondole. D'ailleurs, la gaieté des jours de fête et les mille incidents du trajet étaient là pour leur rendre courage.

Avant de quitter la première moitié du ^{xix}^e siècle, il ne me reste à mentionner qu'un fait intéressant, la substitution du frein à vis au sabot.

Lorsque s'ouvrit l'Exposition universelle internationale de Londres, en 1851, deux courants se manifestaient dans la carrosserie de luxe et dans la carrosserie bourgeoise, l'un en faveur de la voiture à train, l'autre en faveur de la voiture sans train. Des deux systèmes, le premier, qui continuait à avoir beaucoup de partisans, était presque exclusivement adopté pour les voitures d'apparat. Quant au second, il cherchait encore sa voie, mais devait nécessairement prévaloir le jour où une combinaison plus heureuse des ressorts permettrait de suppri-

mer les légères trépidations dont les soupentes garantissaient complètement les voitures à train. D'une manière générale, les fabricants apportaient plus de pureté et d'élégance dans les formes, plus de soin dans l'ajustement, plus de précision dans l'établissement et le montage des pièces mécaniques. Nos produits se distinguaient par l'excellente qualité des matières premières et par le bon goût du dessin aussi bien que de l'ornementation; mais l'Angleterre gardait la prépondérance au point de vue du fini, notamment pour la quincaillerie.

Sous le second Empire, période de grand luxe, les modes anglaises dominèrent encore assez longtemps. La carrosserie française réussit toutefois à s'affranchir enfin de cette tutelle, et, à partir de 1878, elle occupait incontestablement le premier rang : ce résultat de persévérants efforts allait être consolidé par un fécond enseignement professionnel.

Au cours des trente dernières années du siècle, les différences entre les types des divers pays se sont généralement atténuées. L'usage des voitures de grand luxe a, sinon disparu, du moins subi une notable réduction. En revanche, les carrossiers ont introduit une extrême variété dans leurs modèles, chacun d'eux s'efforçant de donner un cachet personnel à ses produits. Suivant les époques et la mode, la faveur s'est portée vers les voitures légères ou robustes, vers les formes carrées ou rondes. Parmi les autres faits saillants, on peut signaler les simplifications du montage, le soin apporté aux accessoires, l'application sur les roues de bandages élastiques en caoutchouc (bandes pleines, bandes creuses ou pneumatiques), enfin la vulgarisation de l'industrie du carrossier, facilitée par la diffusion de l'enseignement professionnel et par la création d'industries annexes. Eu égard au caractère artistique de la carrosserie de luxe, à l'impossibilité où elle est de produire en série, à la complexité des surfaces que comportent les caisses, le travail se fait entièrement ou presque entièrement à la main comme par le passé.

En 1900, les principaux types de voitures de luxe étaient les suivants : 1° dans la catégorie des voitures à deux roues, cabriolets, carricks à pompe et double suspension, charrettes, dogs-carts, hansom-cabs, tilburys, tonneaux ; 2° dans la catégorie des voitures à

quatre roues et à simple suspension, berlines, breaks, cabs, charrettes, coupés, dogs-carts, ducs, landaus, mylords, phaétons, spiders, victorias, vis-à-vis; 3° dans la catégorie des voitures à quatre roues et à double suspension, calèches, coupés, dorsays, ducs, mylords, phaétons, victorias, vis-à-vis. Il y a lieu d'y joindre les phaétons-mails et les mails-coachs, remarquables par leur montage spécial, dans lequel la suspension à huit ressorts en châssis repose sur un train non suspendu.

À côté de ces types en quelque sorte universels, l'Exposition de 1900 montrait certains types locaux établis pour répondre à des besoins particuliers : les charrettes de chasse de Hongrie, les drowskis russes, les petits phaétons américains (buggies), les carrioles norvégiennes, etc.

Tandis que la carrosserie de luxe évoluait ainsi au cours de la seconde moitié du siècle, l'industrie des voitures destinées aux services publics ne restait pas inactive. Aujourd'hui, cette classe de véhicules se compose uniquement des omnibus et des voitures de place, car les malles-postes et les diligences ont disparu devant la locomotive. La préoccupation dominante est ici de construire économiquement, de réduire le poids mort, sans sacrifier la solidité, sans diminuer outre mesure le confortable, sans compromettre la sécurité des voyageurs. Une large place peut être réservée au travail mécanique, puisque les mêmes pièces se reproduisent chaque année en un nombre considérable d'exemplaires. La Compagnie générale des omnibus et la Compagnie générale des voitures à Paris ont fait de sérieux efforts et très heureusement amélioré leur matériel.

Une spécialité intéressante est celle des voitures d'enfants ou de malades. De même que les autres branches de la carrosserie, elle a réalisé d'incontestables progrès. Les constructeurs se sont ingénies à rendre le mouvement aussi doux que possible, à faciliter la traction, à développer le confortable du véhicule, à en améliorer les formes extérieures.

Il existe encore toute une série de véhicules originaux, tels que les voitures et brouettes chinoises, les palanquins de l'Inde et de la Chine, les filanzanes de Madagascar, et, sans aller si loin, les vinaigrettes

employées jusqu'à une époque récente dans certaines villes du Nord. L'étude de ces véhicules serait fort curieuse, mais sortirait du cadre d'un aperçu sommaire sur la carrosserie à travers le siècle.

Le matériel affecté au transport des matériaux et des marchandises est construit par l'industrie du charronnage. Il comprend des véhicules à traction humaine (brouettes, binards ou diables, voitures à bras de diverses formes), des véhicules à traction animale et à marche lente (tombereaux, binards, triqueballes, fardiers, haquets, chariots, charrettes, fourragères, guimbardes, camions, fourgons, etc.), des véhicules à traction animale et à marche plus ou moins rapide, comme les voitures de livraison.

Si, pour quelques-uns de ces véhicules, la structure rustique du début a subsisté sans modification essentielle, d'autres, au contraire, ont reçu des perfectionnements et, en particulier, une suspension. Les voitures de livraison sont souvent traitées avec un soin et une élégance qui les rapprochent de la carrosserie de luxe.

2. Sellerie et bourrellerie. — Au commencement du ^{xix}^e siècle, les selles et les harnais laissaient beaucoup à désirer; leur forme était, en général, lourde et grossière. Sauf pour quelques articles de luxe, d'ailleurs critiquables au point de vue du bon goût, la France se montrait inférieure à l'Angleterre. L'industrie nationale comprenait mal la ferrure, préparait ses cuirs d'une manière défectueuse et ne soignait guère que les piqûres; aussi nos chevaux étaient-ils garnis dans des conditions déplorables et souvent blessés.

Mais, à partir de 1816, diverses maisons s'efforcèrent, les unes de donner aux ferrures la cambrure et le fini voulus, les autres de rechercher pour les cuirs des formes élégantes et commodes. Dès 1825, ces efforts obtenaient leur récompense et nos produits étaient recherchés à l'égal des produits anglais.

Depuis, le renom universel de la fabrication française n'a fait que se consolider et s'accroître. Ses mérites sont partout reconnus. Elle se recommande par le choix consciencieux des matières, la solidité, l'économie, la légèreté, l'élasticité, l'habile ajustement et la perfection du

travail. Le harnachement des chevaux de gros trait a eu d'ailleurs sa part du progrès.

Cette industrie devait, comme les autres, marquer une tendance à l'uniformisation des modèles dans les différents pays. Le mouvement s'est nettement accusé dans les dernières Expositions universelles. Une caractéristique générale de la production contemporaine est le soin mis à relever les formes du dos de l'animal et à protéger les parties exposées aux blessures.

Parmi les innovations récentes, on peut signaler l'emploi du caoutchouc gonflé pour les colliers d'attelages de luxe.

Échappant pour quelque temps encore à la loi fatale du nivellement, certains produits exotiques gardent le charme d'un caractère original et d'un style pittoresque. Le Mexique met ingénieusement en œuvre les ressources d'une ornementation où le cuir s'allie à la fibre végétale, le filigrane d'or et d'argent à la découpe, à l'incrustation, aux reliefs en cuir et en broderie; la Tunisie, l'Algérie, le Maroc jettent à profusion les notes gaies de leurs broderies d'or ou d'argent, exécutées en de corrects dessins orientaux sur des étoffes de velours et de soie aux nuances variées et aux tons harmonieux; l'Indo-Chine étonne par les bariolures éclatantes, les figures grimaçantes et les motifs fantastiques de ses harnachements.

3. Cycles et motocycles. — À chaque pas, le marcheur soulève, même en terrain horizontal, une partie de son poids; puis, au moment où le pied porté en avant pose sur le sol, une fraction de la force vive s'éteint brusquement. Le pas suivant exige presque le renouvellement du même effort. Comme le faisaient remarquer avec raison les rapporteurs du jury de 1878, il ne faudrait point en conclure que la locomotion humaine soit défectueuse : car elle a été créée pour des besoins multiples. Mais on conçoit qu'il soit possible, dans certains cas, de la transformer avantageusement, à l'aide d'engins mécaniques permettant l'utilisation de la force vive acquise : le vélocipède est un de ces instruments, propre à la translation en terrain horizontal ou sur de faibles rampes. Les vélocipédistes admettent que, pour un temps déterminé, leur fatigue ne dépasse pas celle du marcheur

malgré le triplement du chemin parcouru et qu'elle se dissipe plus facilement.

À quelle époque remonte l'invention ou plutôt l'idée première du vélocipède? Il est assez difficile de le dire. On sait néanmoins que, dès 1790, de Sivrac imaginait le *célérifère*. Cet appareil se composait de deux roues d'égal diamètre reliées par une pièce de bois qui présentait la forme d'un quadrupède, cheval ou lion. Le cavalier, à cheval sur la traverse, frappait alternativement le sol de chaque pied et parvenait à imprimer au véhicule une vitesse dépassant de beaucoup celle de la marche. Une vieille estampe représente des incroyables du Directoire montés sur une machine de ce genre; le *célérifère* avait alors changé de nom et s'appelait *vélocifère*.

Vers 1818, un Badois, le baron Drais de Sauerbron, fit grand bruit autour d'une découverte qui devait, à son sens, bouleverser la face du monde; il avait articulé la roue antérieure du *célérifère*, facilité ainsi la direction et donné par surcroît au cavalier le moyen de maintenir son équilibre. Le nouvel appareil reçut le nom de *draisienne*.

Presque aussitôt, les Anglais remplacèrent la *draisienne* en bois par le *hobby-horse* en fer, beaucoup plus léger et plus fin d'allures.

Le *célérifère*, la *draisienne* et le *hobby-horse* étaient presque oubliés quand, en 1855, un jeune ouvrier serrurier, Ernest Michaux, songea à munir le moyeu de l'une des deux roues de manivelles-pédales, sur lesquelles devaient agir les pieds du cavalier. C'est de cette innovation que date le vélocipède. Il conquiert bientôt la faveur publique et provoquait même un véritable engouement à Paris, lorsque survinrent les événements de 1870, qui firent passer la construction entre les mains des Anglais.

Déjà le bois avait définitivement cédé la place au métal; des rayons en fil de fer ou d'acier, travaillant à l'extension, se substituaient aux rais ordinaires travaillant à la compression. Bientôt, M. Truffault réalisait un perfectionnement nouveau par l'emploi des tubes fourreaux et des jantes creuses en acier.

En 1878, les vélocipèdes occupèrent une certaine place à l'Exposition. Ils consistaient exclusivement en *bicycles*, instruments de vitesse formés à l'avant d'une grande roue motrice, avec gouvernail et frein,

et à l'arrière d'une petite roue porteuse. Leur structure laissait encore à désirer. Un de leurs inconvénients était de placer le vélocipédiste à un niveau très élevé, où il risquait des chutes dangereuses, soit vers l'avant, soit sur le côté.

Trois mois après, apparut le *tricycle*, qui descendait en droite ligne d'un instrument analogue essayé en 1869 et qui se recommandait par sa stabilité, par la sûreté de sa direction, par la possibilité de stationnement sans quitter la selle, par la faculté de prendre des bagages. En 1885, vint le *bicycle de sûreté*, plus léger que le tricycle, moins haut que le bicycle, néanmoins aussi rapide que ce dernier appareil, grâce à l'invention de Sargent qui obtenait la multiplication de la vitesse par une chaîne reliant deux couronnes dentées, montées l'une sur l'axe des pédales et l'autre sur l'essieu de la roue motrice. À peine né, le bicycle de sûreté disparaissait devant la *bicyclette*, dont l'idée première remontait à 1869 et appartenait à M. Montagne.

Aussi légère et plus rapide que l'ancien bicycle, la bicyclette avait deux roues égales, de diamètre réduit. La selle portait sur la roue d'arrière, devenue roue motrice, et les chutes en avant étaient rendues impossibles; quant aux chutes latérales, elles pouvaient être facilement évitées et, en tout cas, devaient rester généralement inoffensives, par suite de la faible hauteur des roues.

Les roulements à billes en acier trempé, qui avaient été créés dès 1869 par un Français, M. Suriray, puis repris par un Anglais, M. Rudge, furent naturellement appliqués à la bicyclette. On commença par armer les jantes de bandages pleins en caoutchouc, suivant l'usage alors suivi pour les bicycles. Aux bandages pleins succédèrent les bandages creux (1889). La même année ou l'année suivante, Dunlop réinventait les pneumatiques, imaginés par Thompson en 1845, et, à la suite d'améliorations auxquelles le nom de M. Michelin restera attaché, les nouveaux bandages entrèrent dans la pratique courante; des divers types, les meilleurs, dits à talons, étaient démontables et se composaient de deux éléments, la chambre à air et l'enveloppe.

Plusieurs modèles de chaînes ont été préconisés et sont employés avec succès dans des cas déterminés, notamment les chaînes à mail-
lons plats, les chaînes à simples rouleaux et les chaînes à doubles rou-

leaux. On a cherché à supprimer la chaîne et à transmettre le mouvement des pédales à la roue motrice au moyen de pignons d'angle montés sur un axe commun et engrenant respectivement, l'un avec la couronne dentée du pédalier, l'autre avec celle du moyeu : malgré certains avantages, le système acatène ne s'est pas encore substitué à la chaîne.

Le premier frein en date et aussi le plus simple est le frein à patin agissant sur le bandage de la roue d'avant; mais il perd son efficacité en cas de crevaison du pneumatique. D'autres systèmes, présentant des qualités diverses, sont ceux des freins sur jante, des freins sur tambour et des freins automatiques commandés par les pédales.

Afin de mieux approprier la bicyclette au parcours d'itinéraires accidentés; les constructeurs se sont ingénies à la munir de dispositifs spéciaux pour les changements de vitesse : changements simples, se faisant au repos; changements automatiques (superposés ou juxtaposés), s'effectuant en marche. Les recherches, assez laborieuses, ont conduit à quelques solutions satisfaisantes. Une condition essentielle est que la démultiplication ne coïncide pas avec une diminution du rendement mécanique de la transmission.

Une nouveauté, ou plutôt la reprise d'une invention de Truffault, la *roue libre*, a maintenant beaucoup d'adeptes. Elle permet au cycliste de mettre les pieds au repos, notamment dans les descentes. Un frein énergique est alors indispensable. L'avantage de la disposition ne va pas sans quelques risques.

L'armée devait utiliser la bicyclette pour le transport rapide des ordres. Elle voulut aller plus loin et créer des cyclistes combattants. Ainsi germa l'idée de la bicyclette pliante (1893), qui allait populariser le nom du capitaine Gérard et dont l'Exposition de 1900 offrait d'assez nombreuses variétés.

Aujourd'hui, la bicyclette constitue un véritable instrument de précision. Pour la construire, il faut un outillage perfectionné et en particulier des machines automatiques : l'emploi de pareilles machines suppose une fabrication importante. Les tubes sont en acier trempé, étiré à froid, sans soudure; si l'acier forgé donne les meilleures pièces d'assemblage, le prix élevé des pièces ainsi fabriquées conduit à em-

ployer de préférence la tôle emboutie, travaillée soit par le procédé français en partant d'un tube, soit par le procédé américain en partant d'une tôle plate; les roulements s'obtiennent au moyen d'un décolletage à grands jets d'huile, et la matière lubrifiante est extraite des copeaux par essorage; des fraiseuses à doubles fraises produisent économiquement les pignons et roues dentées.

Outre les bicyclettes à un siège, on a établi des tandems, des triplètes, des quadruplètes, etc. Ces appareils ont perdu de leur vogue au point de vue de l'entraînement, depuis l'introduction des motocyclettes ou bicyclettes à moteur.

Dès 1882, MM. de Dion et Bouton avaient essayé, sans grands résultats, un tricycle à vapeur. Plusieurs tentatives ultérieures, quoique plus satisfaisantes, restèrent cependant infructueuses. Le premier *motocycle* qui fonctionnât réellement fut la bicyclette Hildebrand et Wolfmuller, avec moteur à pétrole (1895). Cette bicyclette, exploitée en France par la Société Duncan et Suberbie, échoua, comme tant d'autres, dans le parcours Paris-Bordeaux-Paris. En 1896, surgirent la *voiturette* à trois roues de Léon Bollée, avec moteur à pétrole horizontal, à refroidissement par ailettes et allumage par incandescence, puis le tricycle de Dion-Bouton, qui affirmait aussitôt son endurance et inaugurerait une carrière exceptionnellement brillante. Vinrent ensuite : la bicyclette électrique Pingault, devenue tandem ou triplète et arrivant à d'énormes vitesses sur la piste; la bicyclette à pétrole Wolfmuller, effectuant une heureuse rentrée; la motocyclette à pétrole Werner; etc. La préoccupation de la vitesse dominait tout. Aujourd'hui, on est revenu à une plus sage conception des choses; quelques maisons se sont attachées à construire un *motocycle* pourvu d'un changement de vitesse et d'un embrayage progressif; plusieurs ont fourni, sous forme de quadricycle, un véhicule automobile à deux places très simple et très économique, qui, après une période de faveur, a complètement disparu.

Un bel avenir est encore ouvert aux motocycles, et spécialement à la motocyclette, appareil assurant l'indépendance des cyclistes, en même temps qu'il a le mérite d'être peu coûteux et peu encombrant.

Bien que due surtout à des inventeurs français, l'industrie du cycle fut d'abord presque monopolisée par l'Angleterre et l'Amérique. En 1892, les statistiques de notre commerce extérieur spécial accusaient, pour les vélocipèdes et pièces de vélocipèdes, une importation au net de 573,430 kilogrammes (8,601,450 fr.). Huit ans plus tard, grâce aux efforts des producteurs français, la situation s'était profondément modifiée : les sorties, dirigées vers l'Allemagne, la Belgique, l'Angleterre, la Suisse, l'Italie, etc., atteignaient 440,723 kilogrammes (6,610,845 fr.), y compris les motocycles, et dépassaient ainsi dans une forte proportion les entrées, descendues à 307,673 kilogrammes (4,618,095 fr.) ; l'Angleterre recevait de la France plus qu'elle ne lui envoyait, et la grosse part de notre importation venait des États-Unis (127,299 kilogrammes).

Les progrès du cyclisme ont été merveilleux vers la fin du siècle. En 1900, l'impôt était perçu sur près d'un million de cycles ; il y avait environ une bicyclette par 40 habitants, soit cinq fois plus qu'en 1894. Les adhésions affluaient au Touring-Club, qui accomplissait une œuvre éminemment utile, prodiguait les encouragements aux sports recommandables, cherchait à développer le goût des voyages et la connaissance des sites nationaux, poussait à l'amélioration de nos hôtels et servait par tous les moyens en son pouvoir la cause de l'hygiène.

4. Automobiles. — Plus d'un siècle de recherches et d'efforts s'est écoulé entre les premières tentatives de Cugnot et l'avènement définitif de l'automobile.

En 1769, Cugnot, ingénieur militaire français, entreprenait la construction d'un fardier tricycle ou cabriot à vapeur, dont la roue d'avant était motrice et directrice. Cette voiture, chargée de quatre personnes, aurait atteint en terrain horizontal une vitesse de 1,800 à 2,000 toises par heure ; mais la défectuosité et l'insuffisance de son générateur l'obligeaient à des arrêts fréquents ; sa direction présentait d'ailleurs des difficultés, ce qui explique la légende d'après laquelle, dès sa première sortie, elle aurait renversé un pan de mur. Une seconde voiture, commandée à Cugnot par le duc de Choiseul, ministre

de la guerre, et terminée en 1770, figure dans les galeries du Conservatoire national des arts et métiers; elle ne paraît pas avoir été expérimentée. D'autres essais dus à Olivier Evans (1786) et à Robison (1795) ne purent réussir. Trevithick et Vivien (1801), puis Watt et Murdoch, n'eurent pas plus de succès.

Pecqueur, chef des ateliers du Conservatoire des arts et métiers, marqua un progrès en faisant breveter (1828) un chariot à vapeur auquel il appliquait la transmission par chaînes, l'engrenage satellite ou différentiel et la direction par roues pivotantes à l'extrémité de l'essieu avant (cette dernière disposition était de Lanskensperger, 1816). Bientôt, une voiture à vapeur construite en Angleterre par Marconi circulait de Paris à Versailles et à Saint-Germain (1835). La même année, un tricycle remorqueur de Dietz, à roues d'arrière motrices, se signalait par l'élasticité relative de ses bandages : Dietz avait intercalé du feutre goudronné, puis du liège, enfin du caoutchouc, entre la jante proprement dite et le bandage de roulement. Ensuite vinrent : les voitures Gurney (1828-1835) et Hancock (même époque); les locomotives routières ou de halage et autres véhicules Lotz (1856-1865), Albaret, Aveling et Porter, Thomson (bandages en caoutchouc vulcanisé, 1869); le tracteur à vapeur de Michaux (1870); la première voiture A. Bollée (1873); la voiture tricycle Stapfer, de Marseille, contemporaine de la précédente; la « Mancelle » d'A. Bollée (1878). Plusieurs dispositifs de la Mancelle sont encore usités aujourd'hui pour la direction et la transmission.

Dès 1862, Lenoir, abandonnant la vapeur, avait essayé un moteur à air carburé. Raffard utilisa en 1881 le moteur électrique et adapta des accumulateurs Faure à une voiture de la Compagnie générale des omnibus. MM. de Dion et Bouton (1883) et M. Serpollet (1889) revinrent à la vapeur d'eau, produite dans des chaudières à vaporisation rapide et à haute pression. Enfin MM. Panhard et Levassor présentèrent à l'Exposition de 1889 un omnibus sur rails actionné par le moteur à essence Daimler : ce fut l'ouverture d'une ère nouvelle pour la locomotion automobile et l'origine de perfectionnements successifs que M. Michel Lévy énumère savamment dans son introduction aux rapports du jury de 1900. Les conquêtes récentes ont été

immenses et la merveilleuse exposition de 1900, avec ses magnifiques concours, a montré au monde une nouvelle et puissante industrie, fille du génie français. Le mérite est d'autant plus grand que le problème soulevait des difficultés multiples, considérables et, sous certains rapports, supérieures à celles de la traction des chemins de fer. M. Forestier donne, à cet égard, dans son rapport sur l'Exposition, une étude comparative fort intéressante.

Les automobiles se classent en voiturettes (250 à 400 kilogr.), voitures (400 à 1,000 kilogr.), grosses voitures (au-dessus de 1,000 kilogr.). Ces dernières sont appelées « poids lourds », quand elles doivent transporter des marchandises à faible vitesse.

On y distingue deux parties bien différentes : le châssis et la caisse ou carrosserie.

Le châssis comprend le cadre, les roues et tout le mécanisme.

Ordinairement, le cadre est rectangulaire et se compose de deux longerons réunis par des entretoises. Ces pièces peuvent être constituées par des tubes d'acier, par des fers en \sqcup avec ou sans âme en bois, par du bois armé de tôle d'acier : la dernière disposition offre plus d'élasticité⁽¹⁾.

Les automobiles de 1900 accusaient nettement une tendance à accroître, dans un but de sécurité et de stabilité, l'empattement, c'est-à-dire la distance des essieux (1 m. 60 à 2 m. 25), et la voie, c'est-à-dire la distance entre les roues d'un même essieu (1 m. 18 à 1 m. 35). Afin de mieux combattre le roulis, les constructeurs recouraient aux essieux coudés, qui leur permettaient d'abaisser le centre de gravité sans réduire outre mesure le diamètre des roues (0 m. 75 à 1 m. 06).

Ces roues sont généralement égales entre elles, de manière à diminuer l'approvisionnement des bandages de rechange. Pour les voiturettes ou les voitures très légères, on les fait parfois entièrement métalliques, comme pour les bicyclettes ; mais elles manquent alors d'élasticité, vibrent beaucoup et se voilent facilement. Le type usuel est celui des roues à moyeu métallique (type artillerie), à rais en bois

⁽¹⁾ Depuis 1900, la tôle emboutie jouit d'une faveur sans cesse croissante.

et à jante de la même matière. Suivant le poids des voitures, les bandages consistent en pneumatiques, en bandages de caoutchouc pleins ou en bandages métalliques : les pneumatiques, de beaucoup les plus répandus, coûtent encore très cher ; parmi les moyens d'en réduire l'usure, le plus certain est de répartir aussi également que possible la charge entre les quatre roues et d'augmenter la largeur des bandages. Après une suite d'essais infructueux, le roulement à billes a fini par s'introduire lentement dans la pratique ; il diminue notablement l'effort au démarrage.

Les modes de suspension du cadre au-dessus des essieux varient selon les vues personnelles des constructeurs. Sur l'avant, le ressort le plus employé est le ressort plat, fixé à son extrémité antérieure par un boulon et à son extrémité postérieure par une jumelle ; cependant les ressorts à pincettes ont des partisans, dont le nombre se réduit d'ailleurs de jour en jour. Pour l'arrière, la préférence paraît devoir aller aux ressorts plats, fixés à leurs deux extrémités par des jumelles ; toutefois certains véhicules lourds sont munis de suspensions à quatre ressorts, dont deux transversaux liés à l'aide de menottes ou doubles jumelles.

Eu égard à la grande vitesse que prennent souvent les automobiles, l'avant-train à cheville ouvrière des voitures ordinaires ne peut guère leur convenir. Le dispositif adopté pour les roues directrices d'avant est celui de l'essieu brisé : dans ce dispositif, la partie médiane de l'essieu antérieur reste constamment parallèle à l'essieu arrière ; seules, les roues se déplacent autour d'un pivot vertical porté par une chape à l'extrémité de l'essieu, et les prolongements de leurs fusées doivent se couper sur la ligne de l'essieu arrière. Pratiquement, on se borne à une réalisation approximative de cette dernière condition, au moyen d'une barre d'attelage reliant des bras fixés sur les fusées. Une tige horizontale avec articulations à rotule et ressorts rattache l'un de ces bras à un arc, dans la denture hélicoïdale duquel s'engage une vis sans fin terminant la tige du volant directeur ; ainsi la direction est irréversible, tout en gardant quelque souplesse.

La plupart des automobiles sont actionnées par des moteurs à essence, du type à quatre temps. Dans un précédent chapitre consacré

aux machines thermiques autres que les machines à vapeur, ces moteurs ont été l'objet d'indications qui me dispensent d'y revenir ici, si ce n'est pour rappeler un petit nombre de faits essentiels. Après s'être effectuée par l'échage ou barbotage, la carburation a lieu surtout aujourd'hui au moyen du brassage, dans des chicanes, de l'air et de l'essence introduite par giclage ou par distribution à alvéoles. Pour l'allumage du mélange tonnant, le système du tube en platine incandescent était autrefois le plus usuel; on lui préfère maintenant l'allumage électrique. Une tendance se manifeste à abandonner l'ouverture et la fermeture automatiques de la soupape d'admission, qui dès lors est manœuvrée mécaniquement comme la soupape d'évacuation. Les organes principaux du mécanisme sont enfermés dans un carter servant de châssis au moteur. Des ailettes, avec ou sans ventilateur, avec ou sans circulation d'eau, assurent le refroidissement des parois du cylindre; quand on a recours à l'eau, l'emploi de radiateurs permet d'utiliser presque indéfiniment le même liquide. La régulation des moteurs de faible puissance s'opère à la main, par action sur l'avance à l'allumage et, quelquefois, par étranglement simultané de l'aspiration; celle des moteurs plus puissants est automatique et résulte de la conjugaison des déplacements d'un régulateur à force centrifuge avec ceux de la came d'allumage et avec la manœuvre de la soupape d'évacuation ou l'étranglement de la conduite d'aspiration; parmi les différentes modalités de la régulation automatique, on distingue le système progressif et celui du tout ou rien. Il importe d'équilibrer le moteur, c'est-à-dire de maintenir à peu près fixe le centre de gravité des masses oscillantes, ne fût-ce qu'afin de réduire les trépidations pendant les arrêts.

Dans le cas où la force motrice est demandée à la vapeur d'eau, la chaudière relève, en France, soit de l'un des types à tubes d'eau, soit du type Serpollet⁽¹⁾. Généralement, les constructeurs admettent une pression initiale de 18 à 20 atmosphères; ils emploient des moteurs compound et, moins souvent, des moteurs à plusieurs cylindres accouplés sans compoundage. Les moteurs alimentés par des générateurs du

⁽¹⁾ En Angleterre, les chaudières sont le plus souvent à tubes de flammes.

type Serpollet se construisent comme les moteurs à mélange tonnant; ils sont à simple effet et la distribution a lieu par soupapes. Tantôt les foyers sont disposés pour le combustible solide; tantôt ils brûlent du combustible liquide. L'eau peut être récupérée par des radiateurs. M. Michel Lévy signale un perfectionnement apporté aux voitures de tourisme avec générateur Serpollet et consistant à emmagasiner l'eau surchauffée produite pendant les arrêts.

Par leur souplesse, leur mouvement rotatif, la simplicité de leur montage, les moteurs électriques seraient les moteurs de prédilection des automobiles, si l'approvisionnement d'énergie n'était pas, du moins en l'état actuel, lourd, encombrant, peu commode à renouveler, et si les accumulateurs, très sensibles aux trépidations et surtout aux grandes variations de débit, n'exigeaient pas de fortes dépenses d'entretien. L'avenir de la locomotion électrique sur route est intimement lié à la découverte d'accumulateurs solides, légers et doués d'une capacité très supérieure à celle des éléments actuels. Établi pour distribuer au moteur l'énergie des accumulateurs, l'appareil connu sous le nom de *combineur* réalise les changements de vitesse en agissant sur la différence de potentiel, sur l'intensité du champ magnétique, sur le développement des spires induites.

Des tentatives jusqu'ici infructueuses ont été faites en vue d'associer un moteur à essence à une dynamo génératrice et à une ou plusieurs réceptrices, parfois même à des accumulateurs servant de réserve et de volant.

Un omnibus sur route à trolley automoteur du système Lombard-Gerin circulait en 1900 autour du lac Daumesnil (bois de Vincennes), et le public admirait la facilité de ses évolutions au milieu des autres voitures. Cet intéressant dispositif ne peut convenir qu'à des services et des cas spéciaux.

Entre le moteur et les roues motrices prennent place des organes de transmission, qui n'acquièrent toute leur importance qu'avec les moteurs à essence. Ce sont les appareils d'embrayage, les appareils de changement de vitesse, les appareils de marche arrière et les différentiels. L'appareil d'embrayage le plus commun est un appareil à friction, dans lequel le tronc de cône calé sur l'arbre du moteur se

confond ordinairement avec le volant; M. Michel Lévy mentionne une ingénieuse disposition, offrant entre autres avantages celui de ménager quelque flexibilité à la transmission du couple moteur. Des différents appareils mécaniques pour changement de vitesse, aucun ne reçoit autant d'applications que le train balladeur, constitué par des roues dentées de divers diamètres qui peuvent coulisser sur l'arbre de transmission en face d'un même nombre de roues à diamètres conjugués, solidaires avec l'arbre moteur. Un pignon satellite interposé entre deux pignons des trains de commande sert ordinairement à la marche arrière. Le différentiel permet aux deux roues motrices de devenir indépendantes l'une de l'autre dans les virages et divise à cet effet l'essieu en deux parties capables de tourner avec des vitesses différentes. Pour relier le changement de vitesse, qui est fixé au cadre, et les roues motrices, qui en sont séparées par la suspension, on utilise soit des chaînes à rouleaux, soit une transmission à la Cardan; une bielle d'écartement doit rattacher l'essieu à l'arbre intermédiaire portant le différentiel ou au cadre.

Des freins énergiques sont indispensables aux automobiles. Généralement, les organes de commande, pédales ou leviers, débrayent avant tout le moteur. L'un d'eux serre, au moyen d'une lame ou mieux de mâchoires métalliques, une couronne calée sur l'arbre du différentiel; il peut agir dans le sens arrière comme dans le sens avant; la prudence commande d'en assurer le refroidissement pendant les descentes un peu prolongées. Un second frein, nécessaire ne fût-ce que dans l'éventualité de la chute ou d'une rupture de la transmission déformable entre le cadre et les roues motrices, agit par enroulement ou par mâchoires sur deux tendeurs solidaires de ces roues; son action doit être bien égale des deux côtés et s'exercer dans les deux sens. En cas de nécessité, le moteur à essence est utilisable comme frein, moyennant certaines dispositions. Une béquille protège contre le danger du recul.

On sait la rapide augmentation de puissance et de vitesse des automobiles. En 1894, dans la course de Paris à Rouen, la vitesse moyenne atteinte était de 21 kilomètres par heure, avec un moteur

de 3 ch. 75. Les années suivantes, ces chiffres se modifiaient ainsi : 1895, Paris-Bordeaux, vitesse de 24 km. 2, avec un moteur de 4 chevaux ; 1896, Paris-Marseille, vitesse de 25 km. 2, avec un moteur de 6 chevaux ; 1898, Paris-Amsterdam, vitesse de 44 km. 7, avec un moteur de 12 chevaux ; 1899, Paris-Bordeaux, vitesse de 48 km. 26, avec un moteur de 16 chevaux ; 1900, Paris-Toulouse, vitesse de 65 km. 80, avec un moteur de 34 chevaux. Il n'y avait encore là qu'un début ; dès les premières années du xx^e siècle, les vitesses invraisemblables de 120, 125 kilomètres allaient être atteintes.

La passion des coureurs gagnait les touristes. Il semblait que l'idéal consistât à dévorer l'espace, à passer comme une trombe, sans rien voir du paysage.

Des accidents graves et répétés ont provoqué une réaction. En même temps, se formait l'éducation des mécaniciens. L'automobilisme est ainsi arrivé à plus de sagesse ; il a compris que l'heure de la jeunesse exubérante était passée et que la calme prudence pourrait seule vaincre les derniers préjugés, avoir raison des résistances injustifiées.

Le rapport sur les concours de 1900, celui du jury de la classe à l'Exposition et l'introduction de M. Michel Lévy abondent en données intéressantes au sujet de la force, du poids à vide et en charge, de la vitesse, de la dépense de combustible, du rendement thermique, du prix des transports, pour un très grand nombre de véhicules. Quelques faits s'en dégagent et peuvent être utilement rappelés.

Un tableau dressé par M. Michel Lévy, d'après les observations faites lors des concours de 1900, résume les essais de consommation d'essence auxquels ont donné lieu des véhicules variés, depuis la motocyclette de 1 cheval $\frac{1}{4}$, pesant à vide 42 kilogrammes et en charge 100 kilogrammes, jusqu'à l'omnibus de 12 chevaux, pesant 2,800 et 4,310 kilogrammes. On y voit les vitesses varier de 34 à 19 kilomètres, la consommation totale par kilomètre de 0 l. 026 à 0 l. 346, la consommation par tonne-kilomètre de 0 l. 290 à 0 l. 072.

Dans un second tableau, M. Michel Lévy compare les rendements thermiques d'automobiles fonctionnant, les uns à la vapeur, avec la houille ou le pétrole comme combustible, les autres par explosion,

avec l'essence de pétrole, l'alcool carburé à 50 p. 100 et l'alcool de la régie; le travail moyen exigé par la tonne-kilomètre y est évalué à 30,000 kilogrammètres. Ce tableau accuse pour les automobiles à vapeur un rendement thermique ne dépassant pas 2.6 ou 4.4 p. 100, suivant que le combustible est de la houille ou du pétrole, et, pour les automobiles à explosion, un rendement beaucoup plus élevé, allant de 7.8 à 12.2. La faiblesse du rendement des automobiles à vapeur est rachetée par le prix relativement bas du combustible, quand le foyer brûle de la houille. Pour les automobiles à explosion, le prix du combustible par tonne-kilomètre oscille entre 0 fr. 047 et 0 fr. 080 dans Paris ou 0 fr. 038 et 0 fr. 060 hors de Paris. L'alcool carburé à 50 p. 100, dont le rendement thermo-dynamique est bien supérieur à celui de l'essence, pourrait la concurrencer avec avantage si les distillateurs industriels fournissaient l'alcool trois-six à moins de 30 francs l'hectolitre.

Se livrant, après M. Forestier, à des supputations sur le prix de revient industriel de la tonne-kilomètre par camions à essence, à alcool carburé ou à vapeur (intérêts et amortissement du prix d'achat, dépenses de personnel et de graissage, frais généraux, entretien et réparations, prix du combustible et de l'eau), M. Michel Lévy arrive à des chiffres oscillant entre 0 fr. 16 et 0 fr. 25, c'est-à-dire inférieurs ou au plus égaux à ceux de la traction animale. Deux omnibus, l'un à essence, l'autre à vapeur, ont concouru en 1900 et donné respectivement, pour le voyageur-kilomètre, des prix de revient de 0 fr. 04 et 0 fr. 02.

L'autorité militaire devait nécessairement se préoccuper des services que l'automobilisme serait susceptible de lui rendre pour l'accélération de certains transports et pour la réduction des immenses convois de ravitaillement en campagne. Aussi plusieurs puissances européennes et notamment la France ont-elles suivi avec attention les progrès du nouveau mode de locomotion et même entrepris des essais en vue de l'emploi des automobiles aux armées.

Dès 1897, une voiture automobile, appartenant à un réserviste et conduite par lui, suivait, à titre d'expérience, les manœuvres du

15^e corps. Bientôt le Ministre de la guerre, saisi d'offres diverses, chargeait une commission d'effectuer des épreuves en terrain varié. Puis, dans diverses circonstances, il autorisait les directeurs des manœuvres à faire appel aux réservistes de bonne volonté, qui mettraient leurs automobiles à la disposition de l'autorité militaire pendant leur période d'instruction. D'abord limités au transport rapide des états-majors, les essais furent étendus au ravitaillement, lors des manœuvres d'armée de la Beauce en 1900. L'utilité des automobiles en campagne pour certains déplacements de personnes n'est plus douteuse. Mais, en ce qui concerne les convois, la question ne peut être considérée comme résolue. Divers établissements militaires ont cependant reçu l'autorisation d'affecter des tracteurs aux manutentions courantes.

Une place avait été réservée à l'automobilisme militaire dans notre dernière Exposition universelle. On y voyait des véhicules intéressants, dont plusieurs munis d'une carrosserie appropriée : automobiles légers pour le transport du personnel (tricycle, voiturette, voitures, omnibus); automobiles lourds pour le transport du gros matériel (camion et tracteur à vapeur); automobiles mixtes pour transports spéciaux (service de la poste et du télégraphe, service médical).

L'automobilisme, d'origine essentiellement française, est appelé à jouer un rôle de plus en plus étendu dans la locomotion. Sagement réglementé, il accomplira sans aucun doute une brillante carrière.

Aujourd'hui déjà, il alimente en France une industrie active et prospère. La statistique de notre commerce spécial en 1900 enregistrait une exportation de 942,000 kilogrammes (9,420,000 francs), dirigée vers l'Angleterre, l'Espagne, l'Allemagne, l'Italie, la Belgique, etc., et une importation de 52,000 kilogrammes seulement (520,000 francs). Quatre ans après, les sorties étaient passées à 7,103,000 kilogrammes (71,035,000 francs), achetés par l'Angleterre, l'Allemagne, la Belgique, l'Italie, l'Algérie, les États-Unis, l'Espagne, la République Argentine, la Suisse, le Portugal, les Indes anglaises, la Russie, etc.; les entrées ne dépassaient pas 384,000 kilogrammes (3,836,000 francs), venant surtout d'Allemagne.

§ 4. MATÉRIEL DES CHEMINS DE FER ET TRAMWAYS.

1. *Origine des chemins de fer.* — Vers le commencement du xvii^e siècle, les *rails* avaient fait leur apparition en Angleterre, où l'industrie minière les utilisait pour faciliter le roulement des véhicules, soit à l'intérieur des galeries, soit entre l'orifice des puits d'extraction et les points d'embarquement sur bateaux. Ces premiers rails étaient en bois. À partir de 1767, la fonte se substitua au bois. En 1805, la fonte fit elle-même place au fer, dont Nexon préconisait l'emploi en se basant sur la supériorité de l'adhérence qu'assurait ce métal comparé à la fonte; les rails consistaient alors en barres posées de champ.

L'effort à exercer se trouvait considérablement réduit. Cependant les transports sur chemin de fer ne devaient prendre une réelle extension qu'au jour où serait créé un moteur nouveau, la *locomotive*.

Trevithick, qui, à la suite de Cugnot, avait entrepris des essais, d'ailleurs infructueux, en vue de la traction mécanique sur les routes ordinaires, établit en 1804 la première locomotive pour voie ferrée. Sa machine, à chaudière cylindrique, comportait un piston unique agissant par l'intermédiaire d'une traverse et de deux bielles sur les manivelles des roues motrices. Quatre ans après, Trevithick mettait en service à Londres une locomotive du même modèle, appelée *Catch me who can* (m'attrape qui peut).

En 1811, Blenkinsop livra d'autres locomotives qui circulèrent régulièrement entre Leeds et Middleton. Malheureusement, imbu comme ses contemporains d'une idée fausse dont la plupart des constructeurs ne s'étaient pas encore dégagés, il considérait l'adhérence des jantes sur les rails comme insuffisante et assurait la progression au moyen de crémaillères et de pignons dentés. L'erreur commise par Blenkinsop et par ses émules donna naissance à une foule de dispositifs plus bizarres les uns que les autres, inventés dans le but de vaincre une difficulté imaginaire, et entrava l'essor de l'industrie des chemins de fer.

Blackett put, en 1813, détruire le préjugé de ses devanciers. Il

constata qu'avec des rampes et des charges convenablement proportionnées, l'adhérence résultait suffisamment des aspérités de la jante et du rail. L'année suivante, G. et R. Stephenson construisaient à Newcastle la première locomotive étudiée d'après ce principe : ce tracteur, destiné aux mines de Killingworth, avait ses roues accouplées par une chaîne sans fin et ne présentait qu'un piston actionnant les manivelles par une traverse montée sur sa tige. Un peu plus tard (1825), G. Stephenson et Dodd substituaient une bielle rigide à la chaîne d'accouplement des roues ; ils créaient en même temps la pompe alimentaire mue par le mécanisme de la locomotive et puisant l'eau dans le tender : ainsi fut constituée la *Locomotion*. La même année, un autre ingénieur anglais, Hackworth, apportait à la locomotive un perfectionnement qui devait la rapprocher des types actuels et qui consistait à y adapter deux cylindres placés de part et d'autre de la chaudière.

Quelles que fussent les améliorations de leur mécanisme, ces moteurs, munis de chaudières à simple bouilleur intérieur, étaient affectés d'un vice fondamental, l'insuffisance de vaporisation du générateur. Leur puissance et leur vitesse restaient enfermées dans d'étroites limites. Ils ne servaient qu'aux exploitations de houillères, où on se contentait d'une vitesse de 7 à 8 kilomètres par heure.

Marc Séguin, ingénieur français, provoqua une véritable révolution en inventant la chaudière tubulaire : le bouilleur intérieur, au delà du foyer, était remplacé par un faisceau de tubes de petit diamètre que traversaient les produits de la combustion. Appliqué en 1827 par Séguin, sur la ligne de Saint-Étienne à Lyon, le nouveau générateur fut reproduit en 1829 par G. et R. Stephenson dans la locomotive *The Rocket* (La Fusée). Cette machine se distinguait en outre par une autre innovation due aux deux illustres ingénieurs anglais : l'échappement de la vapeur dans la cheminée, pour rendre le tirage plus actif. Elle reçut le prix du grand concours institué par la Compagnie du chemin de fer de Liverpool à Manchester. Son poids en service était de 4,300 kilogrammes ; lors du concours, elle remorqua en palier une charge de 13 tonnes à la vitesse de 22 kilomètres et demi ; puis, débarrassée de sa charge, atteignit 48 kilomètres.

De même que l'Angleterre, d'autres pays avaient eu recours aux

voies de fer avant la création ou du moins avant l'adoption des locomotives. La France débuta par des lignes concédées en vue de la traction par chevaux : Andrézieux à Saint-Étienne (concédée en 1823, ouverte en 1828); Saint-Étienne à Lyon (concédée en 1826, ouverte par sections de 1830 à 1833); Andrézieux à Roanne (concédée en 1828, ouverte en 1834); Épinac au canal de Bourgogne (concédée en 1830, ouverte en 1835). C'est sur le chemin de Saint-Étienne à Lyon, dont Séguin était concessionnaire, qu'eurent lieu les essais de transport des voyageurs au moyen de locomotives, essais habilement conduits et couronnés de succès (juillet 1832).

En Autriche-Hongrie, la première ligne fut celle de Budweis à Gmunden par Linz (192 kilomètres), commencée dès 1825. Cette ligne, reliant la Bohême au centre de l'archiduché d'Autriche et destinée au transport du sel ainsi que d'autres denrées, était à voie unique, avec longrines en bois recouvertes de bandes en fer forgé; l'ouverture de la section de Budweis à Linz (124 kilomètres) eut lieu le 1^{er} août 1832; comme sur nos premiers chemins de fer, la traction se faisait par chevaux.

Aux États-Unis, le réseau commença modestement en 1827, 1828 et 1829 par de très petites lignes : celle de Quincy (6 kilom. 5), à traction de chevaux; celle de Mauch-Chunk (14 kilom. 5), à traction de mules; le chemin d'Ithaca à Owego (47 kilom. 5), avec plans inclinés, dont l'un à traction de chevaux et l'autre à machine fixe; le chemin de Carbondale à Honesdale (26 kilomètres), avec plans inclinés à traction de chevaux. Sur le chemin d'Ithaca à Owego, la superstructure comprenait des longrines, des traverses portées par ces longrines, enfin des rails en bois recouverts d'une mince bande de fer.

Tels furent les tâtonnements du début. Sans nous arrêter davantage à cette période d'enfancement, jetons un coup d'œil rapide sur les progrès qui ont amené les chemins de fer au point où nous les voyons aujourd'hui.

2. Résistances au développement des chemins de fer. Issue de la lutte. — Du jour où la *Fusée* eut fait son apparition et où l'on eut

trouvé le moyen de laminer les rails, l'ère des chemins de fer était ouverte. Cependant, avant de prendre son essor, l'industrie naissante eut à surmonter bien des obstacles, à combattre et à vaincre bien des détracteurs intéressés ou simplement aveuglés soit par l'ignorance, soit par les préventions.

L'histoire de ces luttes est des plus curieuses; elle prouve jusqu'à quel point peut aller l'aberration des esprits, même les plus larges et les plus élevés, quand ils se laissent dominer par l'égoïsme, les préjugés ou la passion.

Croirait-on qu'en Angleterre il se trouva des hommes pour s'opposer à la circulation des locomotives, en montrant les oiseaux détruits par la fumée, les bestiaux affolés, le lait des vaches tari dans sa source, l'incendie semé à profusion par les étincelles, la race chevaline anéantie! Répandues intentionnellement dans le peuple par les entrepreneurs de transports, ces billevesées y firent de si nombreux adeptes que la force armée dut intervenir pour protéger les chantiers de construction des voies ferrées.

Faut-il rappeler, en France, l'opposition de Thiers et d'Arago à la création des premières lignes? Le grand historien, l'illustre et clairvoyant politique considérait les chemins de fer comme devant être limités à certaines lignes de faible longueur; le savant terrifiait ses collègues de la Chambre, en évoquant devant eux le spectre de la pleurésie qui certainement frapperait les voyageurs au passage des tunnels, s'ils échappaient aux catastrophes résultant de l'explosion des locomotives.

Bien des années déjà nous séparent de ces incidents, de ces attaques puérides. La vérité, la science et le progrès ont définitivement triomphé; l'instrument de civilisation et de richesse s'est partout imposé; les « deux tringles de fer parallèles », qu'Arago traitait avec tant de dédain en 1838, sillonnent l'ancien et le nouveau monde; peu à peu, les diligences, les malles-postes, les vieux courriers ont disparu et sont allés prendre place dans quelque magasin aux accessoires, d'où nos petits-fils les extrairont comme des curiosités archéologiques pour les expositions rétrospectives de l'avenir. Grâce aux facilités de transport et d'échange que les chemins de fer ont apportées à leur suite,

l'activité industrielle, le mouvement commercial et le bien-être se sont développés au delà de tout ce qu'on pouvait imaginer. C'est la révolution la plus profonde qui se soit jamais accomplie dans l'ordre matériel et même dans l'ordre moral.

3. Généralités sur les chemins de fer. Tracé et travaux d'art.

— Tout d'abord, les lignes ne parcouraient que de larges vallées et des terrains faciles; le rayon des courbes ne descendait pas au-dessous de 1,000 mètres; les déclivités étaient minimales. Puis, au fur et à mesure que se resserraient les mailles du réseau, l'expérience acquise, les progrès de la construction, les perfectionnements du matériel de traction ont permis aux ingénieurs de s'enhardir, d'assouplir les tracés, d'aborder des régions jugées naguère inaccessibles, d'entreprendre des travaux jusqu'alors irréalisables.

Les tranchées coupent le flanc des collines et des montagnes; les vallons et les vallées se comblent; les ponts et les viaducs s'élèvent majestueusement au-dessus des rivières, des fleuves, ou des abîmes que les remblais sont impuissants à remplir; de larges bras de mer jadis infranchis livrent passage aux locomotives et aux trains de l'une à l'autre de leurs rives; des tunnels d'une longueur démesurée vont fouiller les profondeurs du sol et percer les massifs les plus compacts. Parmi les exemples de ponts, de viaducs et de tunnels précédemment cités, beaucoup disent avec éloquence les merveilles de l'art moderne.

Certains fleuves, certaines anses maritimes présentent une si grande largeur qu'il serait impossible de les traverser au moyen d'un pont; sans dépenses tout à fait excessives. Les ingénieurs ne se découragent pas pour si peu. Ils établissent des bacs à vapeur, recevant les wagons à marchandises, les voitures à voyageurs, les trains entiers (ferry-boats, floating-railways, traject-anstalten, etc). Ces bacs peuvent aussi n'avoir qu'un caractère provisoire, ne servir que jusqu'à l'achèvement d'ouvrages fixes et définitifs. De nombreux passages du genre ont été créés : en Allemagne, sur l'Elbe et le Rhin; aux États-Unis, sur la rivière Détroit, sur la Susquehannah, à l'embouchure du Sacramento; en Angleterre, sur le golfe du Forth; en Danemark, sur le

grand Belt, le petit Belt, le Kattegat; etc. Dupuy de Lôme avait dressé le projet d'un bateau porte-trains devant relier la France à la Grande-Bretagne.

Les montagnes les plus escarpées, celles dont l'ascension restait jusqu'à nos jours le privilège des touristes courageux, robustes et agiles, n'échappent pas aux conquêtes de l'art. Des lignes à profils vertigineux s'accrochent sur leurs flancs. Ici, ce sont des locomotives spéciales qui escaladent les pics couverts de neige, grâce à d'ingénieux systèmes de crémaillères et de roues dentées, qui transportent en quelques instants sur les plus hauts sommets des centaines de voyageurs; ailleurs, ce sont des machines fixes et des câbles de traction qui remplissent le même office.

Rien n'arrête plus la locomotive. Elle franchit de vastes déserts, d'immenses contrées incultes et inhabitées. Montréal et Vancouver, villes que sépare une distance de 4,676 kilomètres, sont réunies par le Canadian Pacific Railway; le parcours, véritable traversée, dure six jours et ne peut s'effectuer, eu égard au dénuement de certaines régions, notamment de la Prairie des Indiens, qu'avec des trains pourvus de tous les aménagements propres à la vie journalière de l'homme, chambres à coucher, salles à manger, salons, cabinets de toilette, fumoirs, etc.

On sait l'audace déployée par la Russie dans diverses entreprises récentes. Elle a d'abord relié le port de Ouzoun-Ada (sur la mer Caspienne) à Samarkande (au pied du haut plateau de Pamir) par le chemin de fer Transcaspien, ligne de 1,442 kilomètres, construite en deux ans sous la direction du général Annenkoff : cette ligne se développait au milieu d'un pays tellement dépourvu de ressources qu'il fallut loger le personnel des chantiers dans des trains spécialement installés pour cette destination et souvent le ravitailler des points extrêmes, comme d'une base d'opérations.

Encouragée par le succès du Transcaspien, la Russie s'est consacrée avec une prodigieuse énergie à l'œuvre gigantesque du Transsibérien, allant de l'Oural à la mer du Japon, au travers des steppes de la Sibérie. D'après une notice officielle publiée en 1900, la ligne, y compris le chemin de fer de Mandchourie et les embranchements, ne

devait pas mesurer moins de 8,870 kilomètres. Les travaux furent commencés en 1891; neuf ans plus tard, 5,400 kilomètres étaient ouverts et il existait déjà, au moins pendant la plus grande partie de l'année, une communication à vapeur ininterrompue entre la Russie d'Europe et Vladivostok. Cette communication empruntait un bac pour la traversée du lac Baikal (67 kilomètres) et des services de navigation sur la Chilka et l'Amour (2,240 kilomètres); les parcours atteignaient 7,514 kilomètres de Tchelabinsk à Vladivostok et 9,714 ou 10,358 kilomètres de Moscou ou de Saint-Petersbourg au même point de destination; ils devaient être ramenés à 6,484 kilomètres, 8,680 kilomètres et 9,431 kilomètres après l'achèvement de la ligne du Baikal et de l'Est chinois. L'estimation des dépenses principales et accessoires dépassait 2 milliards.

Sans avoir pareille ampleur, plusieurs entreprises de pénétration coloniale, notamment sur le continent africain, sont néanmoins remarquables, ne fût-ce que par les difficultés vaincues. Peut-être verrons-nous un jour l'Algérie rattachée au Soudan par un Transsaharien.

En dehors des régions que les nécessités commerciales ou stratégiques conduisent à doter de grandes lignes, il en est d'autres où les mêmes besoins n'existent pas et auxquelles il serait pourtant injuste de refuser tout instrument perfectionné de transport. Donner à ces régions de second plan des voies ferrées construites et exploitées comme les artères maitresses constituerait une folie ruineuse, une détestable opération industrielle. Elles appellent un outillage plus simple, plus modeste, plus économique. Des chemins de fer secondaires doivent suffire à y apporter la vie et à mettre en valeur tous leurs éléments de prospérité.

J'emploie à dessein cette expression de chemins de fer secondaires pour ne point m'attacher à la distinction arbitraire créée par la loi entre les chemins de fer d'intérêt général et les chemins de fer d'intérêt local. Sans doute, les lignes d'intérêt local sont toujours, sauf erreur du Gouvernement, des lignes secondaires; mais le réseau d'intérêt général comprend aussi des chemins de fer à faible trafic qui ne

méritent pas d'être traités comme les mailles principales de ce réseau et qui n'ont même leur raison d'être que si la construction et l'exploitation en sont dirigées dans des vues de stricte économie. Nos lois, notre classification officielle ne sont d'ailleurs pas celles des autres pays. Au surplus, si l'on voulait suivre la nomenclature inscrite dans notre législation, il faudrait distinguer, outre les lignes d'intérêt local, les chemins de fer industriels qui appartiennent manifestement à la catégorie des chemins de fer secondaires.

Les lignes secondaires sont contemporaines des origines du réseau; c'est même par des voies ferrées industrielles que s'est ouverte l'ère des chemins de fer. Toutefois la plupart d'entre elles ont suivi les lignes principales : il était naturel de desservir les grands courants de circulation avant les courants d'une importance moindre, d'ouvrir les branches mères avant les affluents. L'expérience acquise et les progrès réalisés sur les chemins à gros trafic ont pu ainsi profiter aux chemins d'ordre inférieur, notamment pour la construction de la superstructure et du matériel roulant.

Dans le tracé des lignes secondaires, on s'efforce de réduire au minimum les terrassements et les ouvrages d'art, d'épouser les formes du sol, de serrer les centres de population, de capter toutes les sources de trafic, de ne pas reculer devant les courbes à petit rayon que la faible vitesse des trains permet d'admettre sans danger et sans inconvénient.

4. Voie des chemins de fer. — Après avoir assigné à la voie une largeur de 1 m. 435 entre les bords intérieurs des rails, puis s'être écartée de ce chiffre, l'Angleterre y est définitivement revenue. Les États européens ont en général adopté la même largeur (1 m. 44 ou 1 m. 45); cependant l'Espagne et la Russie font exception, l'une avec 1 m. 73, l'autre avec 1 m. 52.

Sur le réseau des États-Unis, les largeurs sont variées et vont jusqu'à 1 m. 83; la plus usuelle des États du Nord est 1 m. 435 et celle des États du Sud, 1 m. 525. Au Canada, les lignes de premier ordre ont 1 m. 68; cependant on y trouve aussi des voies de 1 m. 44. L'Australie a, suivant les cas, admis 1 m. 60, 1 m. 44, 1 m. 06. Dans les Indes anglaises, la voie des premières lignes mesurait 1 m. 676; depuis,

des largeurs réduites ont souvent prévalu. Ces exemples, qu'il serait facile de multiplier, montrent la diversité des chiffres auxquels se sont arrêtés les différents pays, diversité tantôt fâcheuse, tantôt exempte d'inconvénients.

Les rails en fer laminé, substitués aux rails en fonte, ne tardèrent pas à revêtir les formes encore en usage du type à double champignon et du type Vignole ou à patin. Ce n'est point ici le lieu de rappeler les controverses qui se sont élevées sur la valeur relative de ces deux types; elles ne sont pas closes. Malgré l'avantage d'une stabilité plus grande, le rail à double champignon symétrique ou dyssymétrique n'a qu'un domaine restreint : en France, les réseaux de l'État, d'Orléans, de l'Ouest et du Midi; à l'étranger, les Iles-Britanniques. Les réseaux français du Nord, de l'Est et de Lyon ont le rail Vignole, également employé par l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, la Hongrie, l'Italie, les Pays-Bas, la Norvège, la Russie, la Suède, la Suisse, les États-Unis, de nombreuses colonies anglaises, etc.

Vers 1860, l'accroissement du trafic et l'abaissement du prix de l'acier ont conduit à tenter l'emploi de ce métal dans la fabrication des rails. Depuis longtemps déjà, il est seul en usage. Les procédés Bessemer et Siemens-Martin sont pour beaucoup dans cette innovation.

Le poids des rails, qui était de 13 kilogrammes par mètre courant sur le chemin de Saint-Étienne à Lyon et de 17 kilogrammes sur la ligne primitive de Liverpool à Manchester, a été progressivement élevé au fur et à mesure qu'augmentait le poids des machines. Pour les derniers modèles français, il oscille entre 38 et 48 kilogrammes. L'État belge est allé à 52 kilogrammes (rail Goliath); le London and North-Western Railway, à 51 kilogrammes.

Il y a peu d'années, la longueur des rails ne dépassait pas 5 m. 50 ou 6 mètres. Le désir de rendre moins nombreux les joints, qui tendent nécessairement à affaiblir la voie, a fait allonger les barres dans une notable proportion : en France, elles mesurent aujourd'hui de 11 à 18 mètres. Nos administrations de chemins de fer placent toutes les joints en porte à faux et s'attachent d'ailleurs à les consolider soit par l'adaptation d'éclisses cornières, soit par le rapprochement des traverses voisines.

Quel que soit le type auquel ils appartiennent, les rails ont pour supports des traverses reposant elles-mêmes sur du ballast. Les traverses sont le plus ordinairement en bois, moins souvent en métal. Mis à l'essai vers 1860, le métal a peu à peu gagné du terrain; pourtant le seul réseau français qui les emploie est celui de l'État. Nos autres réseaux font usage de chêne ou de hêtre créosoté et exceptionnellement de pin sulfaté. À l'étranger, l'imprégnation s'effectue aussi au chlorure de zinc pur ou en mélange avec la créosote.

Les rails à double champignon s'assemblent aux traverses par des coussinets et des coins métalliques; les rails Vignole, par des tire-fond et des semelles en feutre, en papier comprimé ou en métal.

Une disposition intéressante appliquée par la Compagnie du Nord pour prévenir le déplacement latéral des voies, surtout après un nouveau ballastage, consiste à relier les abouts des traverses par des madriers longitudinaux noyés dans le ballast.

Parmi les appareils accessoires de la voie, le premier rang revient aux aiguillages. Maintenant, les aiguilles se manœuvrent à distance, avantage précieux au point de vue du groupement des leviers sous la main d'un seul agent. L'Exposition de 1900 montrait un bel ensemble de systèmes appropriés à cette manœuvre : transmissions rigides avec boîtes à billes; commandes par double fil; appareils hydrodynamiques; commandes électriques par électro-aimants ou par dynamos; système électro-pneumatique; système pneumatique. Des dispositifs convenables verrouillent les aiguilles; plusieurs systèmes de commande effectuent cette opération après le déplacement. Par des moyens ingénieux, tels que l'usage de contrôleurs ou de répéteurs, on vérifie la correction des mouvements ainsi exécutés à une distance fréquemment considérable de l'aiguilleur.

La voie des chemins de fer secondaires peut être, suivant la configuration du terrain, la longueur de la ligne et ses relations avec les chemins de fer voisins, soit à largeur normale, soit à largeur réduite, plus souvent à petite qu'à grande largeur. Avec la voie étroite, le tracé gagne en souplesse et en flexibilité; des économies notables deviennent possibles dans les régions accidentées; le prix de la superstruc-

ture, celui du matériel roulant et les dépenses d'exploitation sont susceptibles de certaines diminutions. Il convient cependant de ne pas oublier que la voie large se prête à des courbures prononcées, quand on choisit avec discernement le type de locomotive.

Parmi les chemins à voie étroite, l'un des plus anciens et des plus célèbres est celui de Festiniog (pays de Galles), sur lequel l'écartement des rails ne dépassait pas 0 m. 58; la traction par locomotives y fut substituée, en 1864, à la traction par chevaux; puis on y organisa un service de voyageurs. Il y a lieu de citer également, en Autriche, la ligne de Lambach à Gmunden (1831, voie de 1 m. 11), et, en Belgique, celle d'Anvers à Gand (1847, voie de 1 m. 10). Chez nous, la question ne s'est réellement posée que vers 1863, à la suite des remarquables travaux de la Commission d'enquête instituée en 1861 sous la présidence de M. Michel Chevalier, travaux qui ont été le point de départ de la loi du 12 juillet 1865 sur les chemins de fer d'intérêt local. Malgré les recommandations pressantes de la Commission d'enquête et du rapporteur de la loi au Corps législatif, la voie étroite n'est parvenue que très difficilement à s'acclimater en France; avant 1881, les seuls chemins d'intérêt local qui ne fussent pas concédés à voie normale mesuraient ensemble une longueur de moins de 230 kilomètres. Depuis, un revirement sensible s'est produit dans l'opinion : le nombre et le développement des lignes d'intérêt local ne pouvant recevoir les véhicules des grands réseaux ont considérablement augmenté; la voie étroite a même commencé à prendre possession des chemins secondaires d'intérêt général. La largeur la plus ordinairement admise est celle de 1 mètre; toutefois certains départements sont descendus jusqu'à 0 m. 60, chiffre adopté aussi par l'autorité militaire pour beaucoup de ses chemins de service. Des circonstances particulières peuvent justifier ce très faible écartement des rails; néanmoins la voie de 1 mètre doit être généralement préférée pour les lignes ayant à faire un service public : elle est plus solide, comporte un matériel plus stable, permet de donner aux véhicules une capacité plus grande et offre assez de souplesse pour épouser la configuration du sol, même dans des terrains difficiles.

Les rails des lignes secondaires sont plus légers que ceux des lignes

principales; avec l'acier, leur poids par mètre courant peut être abaissé à 25 kilogrammes sur les chemins à voie normale et à un chiffre sensiblement moindre sur les chemins à voie étroite. Pour les petites lignes de 0 m. 60, M. Decauville a employé des rails Vignole en acier pesant 9 kilogr. 500, rivés sur des traverses du même métal et réunis par travées portatives de 5 mètres, 2 m. 50 ou 1 m. 25. Plus on approche de la limite de résistance, plus on doit soigner les attaches des rails entre eux et sur les traverses.

Tous les accessoires de la superstructure sont simplifiés en raison de la faible vitesse et du petit nombre des trains.

5. Appareils de sécurité de la voie des chemins de fer. — La sécurité de la circulation devait naturellement appeler toute la sollicitude des ingénieurs et demander des soins d'autant plus attentifs que le trafic et la vitesse des trains suivaient une progression continue.

Bien que très primitifs, les appareils du début pouvaient suffire, eu égard à la faible fréquentation des lignes et à la lenteur de marche des convois. Mais il fallut bientôt les améliorer. Le premier progrès fut l'établissement de disques manœuvrés à distance, au moyen de chaînes et de leviers, et indiquant aux mécaniciens si la voie était ouverte ou fermée.

L'électricité ne tarda pas à apporter son concours aux chemins de fer, à devenir leur auxiliaire fidèle et incessant, l'un des principaux facteurs de leur développement. Fait digne de remarque, la plupart des applications spéciales de l'électricité ayant pour objet la régularité et la sécurité de l'exploitation furent entrevues dès l'origine par les savants. Si elles ne revêtirent pas de suite leur forme définitive, si elles ne passèrent que progressivement du domaine de la science et de la théorie dans le domaine de la pratique, c'est qu'au début la fréquentation du réseau n'obligeait pas à y recourir. Peu à peu, les exigences d'une situation nouvelle ont fait reprendre des problèmes posés depuis de nombreuses années et même des solutions dès longtemps indiquées.

Ce fut tout d'abord la télégraphie électrique que les ingénieurs introduisirent sur une section du Great-Western, en 1839, dix ans après l'établissement de la ligne de Liverpool à Manchester, puis sur

le chemin de Londres à Blackwall, en 1841, pour signaler les trains et transmettre les ordres, les avis, les instructions. Sans ce précieux auxiliaire, l'exploitation des voies ferrées n'aurait pu prendre son admirable développement. Il ne sera pas inutile de rappeler incidemment que les conditions du service télégraphique des chemins de fer diffèrent de celles du service public : bien que gardant de l'importance, la rapidité des communications est primée par la simplicité et la facilité d'usage des appareils, mis entre les mains d'un personnel sans instruction spéciale.

En 1842, sir William Forthergill Cook, tirant fort ingénieusement parti du télégraphe, posait les bases de la protection des trains par le block-system, c'est-à-dire par l'intervalle de distance substitué à l'intervalle de temps. Deux ans après, ce mode de protection était inauguré sur une partie à voie unique du chemin de fer de Norwich à Yarmouth. La ligne se trouvait divisée en sections, dans chacune desquelles deux trains ne pouvaient se trouver simultanément. Des agents signalaient les trains au moment de leur entrée dans une section quelconque et les chefs de station lisaient sur un cadran à aiguille Wheatstone l'indication de cette section.

Pendant de longues années, le rôle de l'électricité fut ainsi restreint à celui d'agent de correspondance, effectuant ses transmissions par les appareils Bréguet à cadran, par les indicateurs plus spéciaux de Regnault ou de Tyer et par l'appareil Morse. Elle n'agissait directement sur les appareils signaux que pour mettre en mouvement des sonneries ou timbres électro-mécaniques, dont le courant électrique actionnait ou déclenchait le mécanisme.

Dans ce dernier ordre d'idées, l'Allemagne peut prétendre à la priorité : l'usage des cloches dites allemandes remonte à 1846 et les cloches Leopolder étaient déjà connues en 1861. Les cloches électriques, placées dans les gares ainsi que dans certains postes intermédiaires et destinées à produire des signaux acoustiques, à annoncer les trains, à donner l'alarme, envahirent l'Allemagne, la Hollande, l'Autriche. Moins hospitalière pour les gros avertisseurs sonores, la Grande-Bretagne demanda simplement aux courants électriques d'actionner des timbres à l'intérieur des postes.

Il faut aller jusqu'en 1872 pour rencontrer chez nous les premiers appareils Lartigue, Tesse et Prudhomme, assurant la transmission effective et directe par l'électricité de signaux à vue entre deux postes. Les électro-sémaphores ainsi créés furent bientôt mis en expérience régulière sur la ligne de Paris à Creil. Antérieurement, des dispositifs atteignant le même but, notamment ceux de Siemens et Halske, avaient été appliqués par les administrations allemandes et autrichiennes.

Jusque vers 1880, le cantonnement ne s'était imposé à la France que dans quelques cas particuliers. Tout se bornait à une utilisation restreinte des indicateurs Regnault, essayés en 1853, et de l'appareil Tyler, qui, expérimenté en 1856, s'étendit progressivement à l'ensemble de la ligne Paris-Marseille, avec adjonction de l'avertisseur Jousset. À la suite d'un accident survenu le 15 août 1879, entre Flers et Monsecrét, et des prescriptions ministérielles provoquées par cet accident, le block-system a été installé sur un grand nombre de lignes et organisé au moyen des appareils Regnault, Tyler, Lartigue-Tesse-Prudhomme, etc. Les compagnies ont dû également, pour déférer aux injonctions du Ministre des travaux publics, faire sur les lignes à voie unique une large application des cloches déjà employées dans l'étendue de certaines sections particulièrement chargées.

Un des actes les plus importants accomplis dans le domaine de l'exploitation technique a été l'institution d'un Code des signaux arrêté par M. Demôle, Ministre des travaux publics, le 15 novembre 1885, alors que j'étais chargé de la Direction générale des ponts et chaussées, des mines et des chemins de fer. Ce Code a eu pour objet, non de réglementer les dispositions mécaniques des signaux (réglementation qui eût été fatale au progrès), ni d'en soumettre la répartition à des règles invariables, mais d'en uniformiser le langage, de déterminer le sens de leurs apparences ou de leurs sons. Il porte à la fois sur les signaux mobiles ou fixes de la voie et sur les signaux des trains.

Le résultat des études poursuivies par l'Administration des travaux publics après l'accident de Flers n'a pas été seulement l'extension rapide du block-system et des cloches. Ces études ont, en outre, conduit à la généralisation des enclenchements. On désigne ainsi une

conjugaison, une solidarité établie entre divers appareils, de telle sorte que l'un d'eux ne puisse occuper une position donnée si les autres n'ont pris, de leur côté, une position correspondante et déterminée par l'enclenchement. Peuvent, par exemple, être enclenchés : 1° des signaux optiques et des aiguilles, afin d'empêcher que les mécaniciens ne reçoivent un signal en désaccord avec la direction des aiguilles; 2° des aiguilles entre elles, pour porter obstacle à ce qu'elles prennent simultanément des positions qui mèneraient deux trains sur une même voie et exposeraient à une collision; 3° des signaux entre eux, de manière à assurer la concordance de leurs positions; 4° des signaux avec des barrières de passages à niveau, afin de prévenir l'ouverture de ces barrières sans que le passage soit couvert par les disques destinés à le protéger. Les enclenchements se réalisent soit à l'aide de moyens exclusivement mécaniques, soit par des dispositions dans lesquelles l'électricité intervient seule ou concurremment avec les moyens mécaniques. Ils sont opérés, tantôt sur place dans le poste de manœuvre et de commande des appareils, tantôt sur les appareils eux-mêmes à une distance plus ou moins grande du poste de commande. Le système d'enclenchement sur place est dû à M. Vignier, ingénieur de la Compagnie de l'Ouest, qui l'introduisit dès 1855 dans la pratique des chemins de fer; plus tard, un type très répandu a été celui de MM. Saxby et Farmer. Parmi les divers organes d'enclenchement à distance, il convient de citer comme l'un des premiers la serrure Annett.

Aujourd'hui, les appareils servant à la manœuvre des signaux et des aiguilles, ainsi qu'à leur enclenchement réciproque, sont souvent groupés en nombre considérable, 100 et davantage, dans une même cabine. Là, de modestes agents guident, sans hésitation et sans danger d'accident, les locomotives et les trains au milieu de l'enchevêtrement des voies.

Les deux dernières Expositions universelles de Paris, notamment celle de 1900, ont attesté les progrès constants des appareils de sécurité de la voie. On y voyait, pour les signaux comme pour les aiguilles, des modes variés de commande : fil simple, fil double, électricité, eau comprimée, air comprimé, procédé électro-pneumatique. Le block-system était représenté par des systèmes très divers fournissant en

général comme minimum de garanties la solidarité immédiate et complète des signaux électriques et des signaux à vue, le calage mécanique à l'arrêt des signaux visuels jusqu'à réouverture par le poste suivant, le maintien de tous les signaux à l'arrêt dans le cas où l'électricité ferait défaut; certains modèles traduisaient un programme plus complet et plus rigoureux; une tendance se manifestait à relier les signaux de cantonnement aux signaux d'entrée de gare, afin d'obtenir la continuité de la protection des trains. Entre autres types économiques d'enclenchement, on remarquait celui de M. Bouré, résultant d'une combinaison de serrures individuelles avec une serrure centrale.

Depuis 1852, le problème de la manœuvre automatique des signaux s'est posé aux ingénieurs et a engendré d'innombrables inventions. Quelques appareils fonctionnant sans l'intervention de l'homme ont fini par être adoptés : tel l'avertisseur, dit *crocodile*, du passage des trains devant un signal fermé; telles encore certaines pédales électriques. Jusqu'ici néanmoins, l'Europe n'a admis l'automatisme qu'à titre d'auxiliaire, ne lui a fait qu'une part restreinte dans les systèmes de protection des trains, n'a pas voulu éliminer l'action humaine, a craint de ne pouvoir obtenir un contrôle efficace du fonctionnement des appareils automatiques, exposés aux défaillances inévitables des mécanismes les plus savants et les mieux exécutés. Eu égard au progrès incessant des ressources offertes par l'électricité, il est probable que le rôle de l'automatisme grandira dans l'avenir et que celui du personnel se rapprochera d'une simple fonction de surveillance, elle-même contrôlée.

Une question intéressante, celle de l'éclairage des signaux de nuit, a donné lieu à d'utiles recherches. La Compagnie du Nord exposait en 1900 des dispositifs d'éclairage électrique bien appropriés au service des grandes gares. Cette Compagnie et d'autres présentaient des appareils permettant le contrôle de l'allumage et prévenant des extinctions.

6. **Locomotives.** — La locomotive était créée le jour où le *Rocket* fit son premier voyage. Pourtant, que de perfectionnements, que d'innovations depuis cette époque! Sans doute, les organes essentiels

ont été conservés. Mais quelle différence entre la petite machine du poids de 4 tonnes, remorquant à la vitesse de 20 ou 25 kilomètres une rame légère de wagons, et les puissantes machines actuelles, pesant jusqu'à 90 tonnes sans le tender, dont les unes traînent d'énormes charges sur des profils accidentés, tandis que d'autres impriment aux longs trains de voyageurs des vitesses de 100 kilomètres et davantage.

Partout, les ingénieurs ont dû sans cesse augmenter la force des machines, élever leur vitesse de marche même pour le transport des marchandises, les approprier au parcours de lignes plus sinueuses, accroître leur stabilité et leur flexibilité, diminuer leurs réactions sur la voie. Ces nécessités diverses se sont particulièrement accentuées vers la fin du siècle. L'augmentation de puissance est obtenue par l'emploi de grandes chaudières à timbre élevé et par l'application du système compound; celle de la vitesse de marche, en combinant l'accroissement de puissance avec les dispositions propres à assurer la stabilité et la flexibilité; celle de la stabilité, par l'adoption de grands empattements et la suppression des masses importantes en porte à faux; celle de la flexibilité, à l'aide de bogies, de bissels ou de dispositifs du même ordre. Plusieurs des mesures qui viennent d'être indiquées, notamment la suppression des masses en porte à faux et l'attaque des courbes par des bogies ou des bissels, diminuent les réactions sur la voie; on peut citer comme concourant au même but la répartition des charges au moyen de balanciers, la réduction apportée aux contrepoids des roues motrices ou accouplées, l'équilibrage réalisé sur les compound en calant à 180 degrés les manivelles de haute et de basse pression, etc. De brèves indications au sujet de ces divers points et de quelques autres sont indispensables.

Les chaudières ont été successivement agrandies dans la limite compatible avec le gabarit et la résistance des voies : pour plusieurs des locomotives exposées en 1900, la surface de chauffe totale dépassait 200 mètres carrés et, pour l'une d'elles, cette surface approchait de 300 mètres carrés; la surface des grilles destinées aux houilles de qualité moyenne allait au delà de 2 m. q. 50, chiffre qui n'avait jamais été atteint si ce n'est avec les grilles Belpaire brûlant des pous-

siers à forte teneur en cendres. Ces grandes dimensions n'étaient possibles que grâce à une surélévation des chaudières, reconnue d'ailleurs sans inconvénient : en 1900, la hauteur de l'axe du corps cylindrique au-dessus des rails montait parfois à 2 m. 80. Limité à 7 ou 8 kilogrammes, il y a cinquante ans, le timbre était réglé à 12 kilogr. 75 en moyenne, lors de la dernière Exposition, et avait même été porté à 16 kilogrammes pour deux locomotives : on voit quelle quantité de calorique peut être ainsi emmagasinée dans le générateur et quelle amélioration peut en recevoir le régime économique de la machine. Des essais intéressants se poursuivent en Allemagne et en Russie pour la surchauffe de la vapeur; M. Michel Lévy loue spécialement le système Schmidt⁽¹⁾, dans lequel le surchauffeur, placé à droite et à gauche de la boîte à fumée, est directement soumis à un courant de flammes venant du foyer par un tube de grande section, qui se ferme aux arrêts et pendant le soufflage; cette surchauffe évite tout au moins la nécessité de réchauffer les cylindres. Les boîtes à feu se répartissent en deux types, l'un à ciel plat, l'autre à ciel en forme de berceau cylindrique; d'une manière générale, les foyers sont constitués par des plaques en cuivre rouge, que des entretoises également en cuivre, quelquefois en bronze manganésé, et presque toujours perforées, relient à l'enveloppe de la boîte à feu; dans la plupart des locomotives exposées en 1900, les foyers étaient munis de voûtes en briques. Aujourd'hui, les résidus de naphte (mazout) fournissent un excellent combustible à divers pays : Russie, Roumanie, Indes néerlandaises, etc.; plus du tiers des locomotives russes brûlent du mazout et présentent à cet effet des foyers garnis de briques réfractaires, où le liquide arrive par des éjecteurs à jet annulaire conique. Encore faite de laiton ou de cuivre au delà de la Manche, la tubulure est en acier doux sur le continent comme aux États-Unis; les tubes en acier à ailettes, expérimentés sur plusieurs réseaux français, paraissent capables d'augmenter la vaporisation. Une des plus belles inventions avait été celle de l'injecteur Giffard, qui commença à remplacer les pompes alimentaires vers 1855;

⁽¹⁾ Le surchauffeur Schmidt était appliqué à une locomotive que les établissements Borsig exposaient en 1900.

l'adoption des hautes pressions a fait abandonner les formes simples de l'appareil et employer des injecteurs à cônes multiples. Quels que soient les perfectionnements apportés aux chaudières de locomotives, on s'accorde à les considérer comme appelant une transformation profonde; elles subissent une fatigue excessive et leurs foyers, coûteux à entretenir, durent trop peu.

Aux locomotives à simple expansion s'opposent de plus en plus les locomotives compound. La première application du système, due à M. Mallet, date de 1876 (ligne de Bayonne à Biarritz); elle comportait deux cylindres de diamètres inégaux, l'un à haute, l'autre à basse pression. Bientôt l'Angleterre et l'Allemagne étudièrent d'autres dispositifs dérivant du même principe; la Compagnie du London and North-Western Railway fit largement usage d'une machine à trois cylindres, dont deux de haute pression et un de basse pression; d'autres pays suivirent le mouvement. En 1900, pour les machines puissantes, la faveur allait aux types à quatre cylindres, dont l'Exposition comprenait 17 spécimens : 12 à quatre manivelles motrices portées par deux essieux distincts (9) ou par un même essieu (3); 2 à deux manivelles motrices, avec cylindres superposés Vauclain ou en tandem; 3 locomotives articulées Mallet, à deux trains moteurs. L'attaque de deux essieux distincts a le précieux avantage de répartir le travail entre eux et de procurer deux mécanismes moteurs pouvant être sans trop de difficultés rendus indépendants. Environ 400 compound articulées Mallet sont en service sur des voies dont l'écartement varie de 0 m. 60 à 1 m. 525; elles donnent la puissance, l'économie de combustible, la division de la charge entre un assez grand nombre d'essieux et enfin la souplesse, mais exigent une certaine limitation de la vitesse. Pour assurer le démarrage des locomotives compound à deux cylindres, quelle que soit la position occupée par le piston du cylindre de haute pression, il faut pouvoir envoyer dans le cylindre de basse pression de la vapeur à 5 ou 6 kilogrammes; différents appareils remplissent convenablement cette fonction; ils sont également utiles sur les machines à 3 ou 4 cylindres, afin de réduire la durée de la mise en pleine vitesse.

Les Anglais ont toujours accordé leurs préférences aux cylindres et

mouvements intérieurs; actuellement, la Belgique s'inspire des traditions britanniques; dans les autres pays, ce sont les cylindres et mouvements extérieurs qui prévalent. Parmi les locomotives exposées en 1900, beaucoup avaient soit des tiroirs équilibrés de type américain ou allemand, soit des tiroirs cylindriques; les constructeurs attestaient leurs efforts pour créer un distributeur satisfaisant au point de vue de l'équilibrage et offrant de larges débouchés à la vapeur. Sur 68 machines, 13 étaient munies de la distribution Stephenson; les autres présentaient, pour la plupart, la distribution Walschaerts. Aucune locomotive à distribution par déclic ou à distributeur genre Corliss ne figurait à l'Exposition. Les appareils de changement de marche à vis devenaient la règle, et les appareils à leviers l'exception. Ordinairement, un seul appareil de changement de marche commandait à la fois les distributions de haute et de basse pression des compound.

Deux types sont en présence pour les châssis : le type américain en fer forgé, presque dépourvu d'entretoisement entre le bloc des cylindres et l'avant de la boîte à feu; le type européen à longerons en tôle d'acier, souvent entretoisés par des pièces d'acier moulé.

Les bogies appartiennent le plus habituellement aux genres à longerons intérieurs, avec pivot à déplacement latéral supportant la charge, et comportent alors soit une suspension pendulaire, soit un rappel par ressorts. Quelquefois, les longerons sont extérieurs et le pivot à déplacement latéral est simplement directeur. Beaucoup de bissels dérivent des boîtes radiales Adams.

Sauf dans certaines machines anglaises, munies de ressorts en spirale, la suspension a lieu par des ressorts à lames. Les balanciers, usuels aux États-Unis et assez répandus en Allemagne, en Autriche, en Italie, en Russie, sont moins employés en France.

Le besoin d'accroître la vitesse des trains fit naître autrefois les machines à roues libres de grand diamètre, dont le type caractéristique fut longtemps la machine Crampton, à roues motrices ayant plus de 2 mètres de diamètre et placées en arrière du foyer. Ce type convenait bien, alors que les trains rapides ne se composaient pas comme maintenant d'un grand nombre de véhicules. Il devint plus tard in-

suffisant et, dès 1855, la Compagnie de l'Ouest français dut lui substituer celui des machines à deux essieux accouplés. Cependant la locomotive à roues libres n'est pas complètement abandonnée; plusieurs compagnies anglaises l'utilisent encore pour des trains très rapides et à charge limitée, la solidité des voies permettant de porter à 19 tonnes environ le poids adhérent de l'essieu moteur; cet essieu se trouve d'ailleurs, non à l'arrière, mais entre deux essieux porteurs ou entre un bogie et un essieu porteur.

G. et R. Stephenson, qui avaient imaginé l'accouplement, le réalisaient au moyen d'une chaîne sans fin, que G. Stephenson et Dodd ne tardèrent pas à remplacer par une barre rigide. L'accouplement s'appliqua à quatre, puis à six, huit et dix roues. En 1850, les machines Engerth, construites pour l'exploitation de la ligne montagnieuse du Semmering et disposées de manière à offrir une forte adhérence avec la souplesse nécessaire au passage des courbes, comprenaient deux trains articulés et montés chacun sur cinq paires de roues d'égal diamètre. Cinq ans après, la Compagnie du Midi mit en service une locomotive à huit roues accouplées. La Compagnie du Nord créa, en 1858, un type analogue, dit à *fortes rampes*; en 1862, elle fit construire, sur les projets de Pétiet, une machine à douze roues accouplées qui pesait 60 tonnes, mais qui fut postérieurement abandonnée. À son tour, la Compagnie d'Orléans adopta, pour la traversée du Lioran (ligne de Murat à Aurillac), des locomotives à dix roues accouplées, construites en 1867. Puis la France s'arrêta dans cette voie; mais les États-Unis poursuivirent le mouvement et mirent en circulation des locomotives à dix roues accouplées, pesant 90 tonnes. L'Exposition de 1900 comprenait des machines à quatre essieux couplés, avec poids adhérent de 52 tonnes à 57 tonnes, et une machine russe à deux trains articulés de trois essieux, avec poids adhérent de 81 tonnes 5.

Les mécaniciens, ces agents zélés et dévoués, qui supportent vaillamment tant de fatigues et dont l'attention soutenue est si indispensable à la sécurité, ont eu leur part dans les perfectionnements de la locomotive. Exposés jadis à toutes les intempéries, ils sont aujourd'hui protégés par des abris partiels, par des abris complets, et même,

pour les longs voyages sous des climats rigoureux, par de véritables cabines.

Unités beaucoup moins importantes que les locomotives, les tenders n'en ont pas moins suivi une progression analogue dans l'accroissement de leur masse. Au début des chemins de fer, la *Fusée* et les machines contemporaines de cette dernière n'avaient qu'un modeste wagonnet portant un tonneau d'eau et quelques approvisionnements. Peu à peu, cet instrument primitif fit place à des véhicules présentant les dispositions d'ensemble que nous sommes habitués à voir aujourd'hui. Il a fallu, pour gagner du temps, franchir d'une seule traite des longueurs de 80, 100, 150 kilomètres, quelquefois davantage, emporter la quantité d'eau nécessaire à ces longs parcours, recourir à des tenders plus volumineux, y charger jusqu'à 20 mètres cubes d'eau et 8 tonnes de combustible. Deux essieux ne pouvant suffire à de telles charges, les constructeurs ont fait des tenders à 3 essieux, à 1 essieu et 1 bogie, à 2 bogies. Fréquemment, du moins à l'étranger, les ressorts de suspension des tenders à 3 essieux sont conjugués par des balanciers longitudinaux qui maintiennent la répartition de la charge. On sait la disposition originale imaginée par M. Ramsbottom, ingénieur du North-Western, et consistant à puiser l'eau en pleine marche au moyen d'une écope dans de longues bâches aménagées sur la voie : cette disposition, permettant de reconstituer l'approvisionnement du tender sans multiplier les arrêts, est usitée en Angleterre et aux États-Unis ; l'Administration des chemins de fer de l'État français se préparait, en 1900, à l'expérimenter.

À peine y a-t-il lieu de signaler les avantages que la construction des locomotives a retirés des progrès de la métallurgie moderne, l'élimination de plus en plus complète du fer par l'acier, le rôle grandissant de l'acier moulé qui devient la matière de prédilection des roues, les essais de métaux plus résistants et plus élastiques que le cuivre pour les entretoises des grands foyers de chaudières à haute pression.

Pour les chemins de fer secondaires, on simplifie autant que possible les locomotives ; on s'efforce de leur donner une puissance suffisante sous un volume réduit ; on facilite leur passage dans les courbes

par la diminution de l'empattement fixe, par l'emploi de boîtes radiales, de bissels, de bogies, de trains articulés. Un type fort répandu est celui de la machine-tender; il convient bien aux faibles parcours et aux profils accidentés, sur lesquels le poids doit être largement utilisé pour l'adhérence.

D'après des renseignements très précis consignés au rapport de M. Salomon sur la classe des chemins de fer en 1900, l'Allemagne, l'Angleterre et surtout les États-Unis sont les trois principaux pays constructeurs de locomotives et ont une exportation active. L'Autriche, la Belgique et la France ont développé normalement leurs ateliers, de manière à conserver la position acquise dès l'origine. Enfin la Hongrie, l'Italie, la Russie, la Suède et la Suisse, plus ou moins tributaires autrefois de l'étranger, peuvent maintenant suffire à leurs besoins; la perfection de leur outillage récent n'est pas sans danger pour d'autres pays.

7. Voitures à voyageurs et wagons à marchandises des chemins de fer. — Primitivement, les véhicules mis à la disposition du public ne brillaient point par le confortable; mais, comparés aux diligences, ils se faisaient accepter sans trop de plaintes et de réclamations. Un de leurs vices les plus graves était d'infliger aux voyageurs des chocs quelquefois fort rudes, par suite de la suspension très rudimentaire des caisses, ainsi que de la rigidité absolue des tampons. Les premières voitures avaient aussi le défaut d'être découvertes, de laisser les voyageurs exposés à la pluie, à la neige, au vent, au soleil; je me rappelle avoir fait le trajet de Strasbourg à Colmar dans un tombereau de cette espèce : ce ne fut pas un voyage d'agrément.

De perfectionnement en perfectionnement, le véhicule mesquin est devenu une large et confortable voiture, parfois même une luxueuse maison roulante, répondant aux multiples exigences du bien-être moderne. Il serait beaucoup trop long de retracer l'histoire quelque peu complète de ces transformations successives. Les changements ont porté non seulement sur les dispositions d'ensemble, mais encore sur les moindres détails; d'intelligentes améliorations se sont réalisées pour ainsi dire au jour le jour; l'œuvre se poursuit et continuera, sans

jamais toucher à son terme, car les exigences du public ne cessent de croître à mesure qu'on s'efforce de les satisfaire. Des collections intéressantes de dessins, figurant au musée centennal de 1900, montraient les différentes phases par lesquelles est passé le matériel roulant depuis l'origine des chemins de fer jusqu'à nos jours.

Pendant longtemps, le type usuel de la voiture à voyageurs a été le type à compartiments séparés. Il est encore en service sur beaucoup de lignes, mais avec plus de confort, avec plus d'ampleur dans les dimensions, dans les baies, dans les espaces offerts à l'air et à la lumière. Jadis peu soignés, les véhicules de troisième classe présentent actuellement des dispositions moins rudimentaires; leurs fenêtres sont garnies de stores; des planchettes ou des filets reçoivent les colis à la main; des coussins recouvrent souvent les banquettes. Une transformation parallèle s'est opérée dans les voitures de deuxième classe, dont les aménagements sont tels en certains pays que le public déserte presque complètement les véhicules de première classe. Dans ces derniers, le luxe s'est accusé; les constructeurs ont fait des efforts incessants pour y rendre les longs parcours aussi peu désagréables et fatigants que possible.

Aux compartiments et aux voitures ordinaires vinrent s'ajouter des compartiments ou des voitures avec salons, fauteuils, lits. Puis apparurent les voitures à intercirculation, originaires des États-Unis et acclimatées en Europe par la Compagnie internationale des wagons-lits. Ce fut une révolution. Elle eut ses protagonistes, qui vantèrent la sécurité et la faculté de mouvement dont allaient bénéficier les voyageurs; elle eut aussi ses adversaires, voyant dans le défaut d'isolement une atteinte aux goûts constatés chez beaucoup de peuples et faisant valoir, en outre, les inconvénients d'un énorme accroissement du poids mort. La réforme devait s'imposer et s'imposa finalement aux administrations de chemins de fer, soit telle quelle, soit sous forme de variantes comme celle du couloir partiel.

Dès lors, une tendance très nette se manifesta à distinguer pour le matériel entre les embranchements et les lignes principales, entre les services ordinaires et les services rapides de long parcours, les premiers gardant le matériel classique, tandis que les autres recevraient

des véhicules généralement montés sur bogies et pourvus de l'intercommunication. Cette tendance était évidente à l'Exposition de 1900. Ainsi que l'indique M. Salomon dans son rapport, les voitures exposées se répartissaient en trois catégories : voitures de luxe (voitures-salons, wagons-restaurants, voitures-lits); voitures affectées aux trains internationaux et aux express de grand parcours; voitures destinées à des lignes secondaires et de banlieue. Pour cinq des voitures-lits de luxe, le poids total variait de 35,600 kilogrammes à 43,520 et le poids mort par voyageur couché, de 2,110 à 3,560. Sur 46 voitures destinées aux trains internationaux ou aux express de long parcours, 20 étaient à 2 essieux, 4 à 3 essieux et 22 à 4 essieux (2 bogies); une voiture à 2 essieux présentait des compartiments séparés, neuf à 2 ou 3 essieux avaient des couloirs partiels, toutes les autres possédaient l'intercommunication; le poids mort des voitures à 2 essieux oscillait entre 11,000 et 19,200 kilogrammes, celui des voitures à 3 essieux entre 15,200 et 22,000 kilogrammes, celui des voitures à bogies entre 29,600 et 36,600 kilogrammes, et les poids correspondants par place offerte entre 160 et 970, 260 et 560, 670 et 1,670 kilogrammes⁽¹⁾. Dans la même catégorie de véhicules, les voitures à deux essieux montraient une augmentation considérable des empattements jusqu'alors admis; souvent, les compartiments des voitures à intercirculation se transformaient la nuit en quatre lits superposés deux à deux par le relèvement des dossiers. Le matériel des services ordinaires n'était pour ainsi dire pas représenté, sans doute parce qu'il ne témoignait d'aucune innovation et se bornait à reproduire des dispositions anciennes; quant au matériel de banlieue, il comprenait des voitures à impériale fermée, une voiture à couloir central avec larges plates-formes d'accès et vastes dégagements, des voitures à intercirculation, etc.

Il y a lieu de citer aussi, entre autres progrès de construction : l'emploi de l'acier laminé pour les châssis et de l'acier moulé pour certaines de leurs pièces; la flexibilité plus grande donnée à la suspension au fur et à mesure qu'augmentait la longueur des caisses; l'usage

⁽¹⁾ Vers 1857, le poids mort pouvait être évalué en moyenne à 235 kilogrammes par voyageur de 1^{re} classe et à 125 kilogrammes par voyageur de 3^e classe.

exclusif de l'acier pour les essieux et les bandages, et ses applications naissantes au corps des roues; le remplacement progressif des roues à rais par les roues à centre plein; la fixation des bandages par des agrafes, au lieu de vis et goujons; divers perfectionnements des appareils de choc et de traction, spécialement l'adaptation aux longues voitures de balanciers compensateurs égalisant les pressions sur les tampons; la substitution de la tôle emboutie aux fers profilés dans les châssis des bogies; l'interposition de ressorts à pincettes jumelés dans la liaison par bielles articulées de la traverse danseuse des bogies avec leur traverse d'appui à suspension pendulaire; etc. Une création fort intéressante et témoignant de beaucoup d'ingéniosité est celle des attelages automatiques américains; malheureusement, elle n'a pu jusqu'ici être étendue dans des conditions pratiques au matériel européen.

Les procédés d'éclairage des voitures se sont multipliés et améliorés. Après la bougie sont venues les lampes à bec plat, puis à bec rond avec ou sans cheminée, brûlant l'huile de colza, et les lampes à bec plat sans cheminée pour pétrole. En 1858, a été inauguré le gaz riche, fabriqué avec les huiles provenant de la distillation des schistes: l'éclairage au gaz d'huile exige des dépenses élevées de premier établissement, mais donne une lumière fixe, constante, et simplifie les manipulations; le gaz est emmagasiné sous pression, soit dans un réservoir unique, soit dans des réservoirs adaptés aux voitures, et un régulateur le distribue aux becs en abaissant la pression au chiffre voulu; vers la fin du siècle, le nombre des voitures pourvues de cet éclairage était évalué à 100,000. Des lampes à récupération ont été inventées en 1890 pour le gaz d'huile; très récemment, on en a accru le pouvoir éclairant par une addition de gaz acétylène. Enfin l'éclairage électrique, expérimenté à partir de 1881, tend à prendre de l'extension, malgré son prix encore élevé: l'électricité est fournie tantôt par des accumulateurs, tantôt par une dynamo empruntant sa force motrice au train lui-même et associée à des accumulateurs de réserve pour les ralentissements, les arrêts et les coupures.

Rien ne montre mieux les difficultés du chauffage des voitures que la variété des moyens mis en œuvre. Les solutions doivent, d'ailleurs,

varier avec le climat, le type des véhicules, la nature et la composition des trains. Pendant longtemps, les bouillottes mobiles ont constitué le mode le plus répandu de chauffage; des dispositions fort ingénieuses avaient été imaginées pour en éviter la vidange et le remplissage, à l'aide d'une injection de vapeur ou d'une simple immersion; mais la main-d'œuvre que demandait la manutention et la gêne qu'elle infligeait aux voyageurs, surtout la nuit, devaient provoquer des recherches dans une autre voie. Deux systèmes en faveur sont ceux de la circulation de vapeur et du thermosiphon. Le premier de ces systèmes, essayé en France dès 1861, s'y était d'abord heurté contre certains inconvénients, tels que le danger des fuites, les difficultés d'accouplement, les frais d'entretien; cependant nous avons fini par l'adopter, après plusieurs autres nations; la vapeur, fournie par la locomotive ou par un générateur spécial, circule à haute ou mieux à basse pression; parfois, elle est mélangée d'air comprimé, qui maintient dans la canalisation des courants assez intenses pour entraîner la vapeur et l'eau de condensation. Moins ancien, le thermosiphon semble avoir été expérimenté pour la première fois en 1872, sur les chemins de fer de la Suisse occidentale; il comporte un foyer, généralement placé à l'extérieur de la voiture et chauffant de l'eau qui circule ensuite dans des tuyaux ou des chaufferettes. Un procédé mixte consiste à réchauffer par un courant de vapeur l'eau contenue dans des chaufferettes. Il convient de mentionner encore : la circulation d'eau chauffée par la vapeur de la locomotive; les poêles, qui donnent une répartition défectueuse de la chaleur et prêtent à certaines critiques au point de vue de la sécurité ou de l'hygiène; l'envoi d'un courant de vapeur dans des chaufferettes remplies d'une dissolution de chlorure de calcium; les chaufferettes à acétate de soude ou de baryte, utilisant le dégagement de la chaleur latente que ces corps absorbent pendant leur liquéfaction; etc.

À une certaine époque, la tendance fut de spécialiser les wagons à marchandises, d'en multiplier les types, de les adapter aux diverses catégories de marchandises. Cette spécialisation poussée à l'excès pouvait avoir de graves inconvénients au point de vue de la construction,

de l'entretien et même de l'exploitation. Le matériel roulant s'éparpille; en effet, non seulement sur toute l'étendue du réseau confié à une même administration, mais encore sur les divers points du territoire, par suite des échanges entre les différents réseaux, et souvent à l'étranger, par suite des transports internationaux. Sauf pour certains courants de circulation nettement dessinés, il est en général impossible d'affecter des wagons aux gares qui donnent lieu à des chargements d'une nature déterminée, et de compter sur leur retour à des époques fixes ou à peu près fixes. Aussi s'est-on arrêté à un nombre restreint de modèles, parmi lesquels prédominent le wagon-tombereau, le wagon couvert à portes roulantes et le wagon plat ou plate-forme. Tel est du moins le principe directeur. Cela n'empêche pas les administrations et les industriels d'avoir des types spéciaux répondant à des besoins particuliers : wagons pour grandes masses indivisibles, wagons réfrigérants avec parois doubles ou triples et enveloppes calorifuges, wagons-citernes pour le vin ou pour d'autres liquides, etc.

Sauf de rares exceptions, les wagons sont montés en Europe sur deux essieux et aux États-Unis sur deux bogies.

La limite de charge, qui ne dépassait guère 10 tonnes en 1889, sur les chemins de fer européens, a été portée à 15 tonnes; quelques réseaux desservant un trafic considérable de minerais ou de houille ont même des véhicules de 20 tonnes. Plus entreprenants, les États-Unis atteignent 40 ou 50 tonnes. On cherche partout à réduire le poids mort par tonne transportée.

De même que pour les voitures à voyageurs, les châssis en profilés de fer ou d'acier se substituent de plus en plus aux châssis mixtes. La traction continue est employée pour la plupart des véhicules, principalement dans l'Europe centrale; les tiges de traction agissent alors sur des ressorts en spirale et les tiges de choc butent contre des ressorts de même nature logés dans les faux tampons. En France, la traction discontinue reste franchement préférée. Les bogies comportent une simple suspension faite de ressorts hélicoïdaux. MM. Salomon et Michel Lévy signalent un remarquable attelage supplémentaire inventé en Russie et rendu nécessaire par l'augmentation de puissance attribuée à certains tracteurs : deux câbles latéraux agrafés aux wagons

s'attellent près de la locomotive sur deux longs cylindres à air comprimé, formant ressort.

Les échanges incessants de matériel entre les réseaux d'un même pays ou des pays limitrophes nécessitent l'uniformité des dimensions principales. Une conférence internationale, provoquée par le Gouvernement fédéral suisse, a fixé en 1886 des règles qui ont été rendues applicables aux chemins de fer français depuis 1887.

Quand, eu égard à leur situation, les chemins de fer secondaires comportent un matériel spécial, ce matériel est naturellement plus modeste que celui des lignes principales. Il doit, le plus souvent, être approprié au passage dans les courbes de faible rayon, par le rapprochement des essieux ou, le cas échéant, par le montage sur bogies.

Les voitures à voyageurs sont ordinairement légères, établies sans dispositifs de luxe, combinées pour un entretien économique. On les fait assez communément à couloirs, de manière à faciliter la perception et le contrôle pendant le trajet; aucun inconvénient ne peut en résulter pour des voyages de jour, dont la durée n'est jamais bien longue.

8. Appareils de sécurité du matériel roulant des chemins de fer.

— Les agents de la traction et de l'exploitation doivent avoir à leur disposition des moyens efficaces pour obéir aux signaux et notamment pour arrêter les trains dans le plus court espace possible, lorsque des circonstances exceptionnelles l'exigent.

Au début, le peu d'importance du trafic, la faible vitesse des trains, leur charge réduite, permettaient de ne point attacher à la question autant d'intérêt que de nos jours. Depuis, les choses ont bien changé et les freins constituent des organes vitaux, dont le perfectionnement sollicite toute l'attention des ingénieurs.

Le principe ordinaire des freins consiste à appliquer contre les roues des sabots mis en jeu soit par les agents de la traction, soit par les conducteurs du train. Un complément très heureux des freins à frottement est la contre-vapeur, dont le mérite revient à Le Chatelier et à M. Ricour (1865) : quand l'admission est renversée, le piston

refoule la vapeur devant lui et perd graduellement sa vitesse, la force vive accumulée dans les roues motrices et le mécanisme s'éteint, la rotation peut ensuite changer de sens et la machine exerce alors contre le train un effort de poussée inverse de l'effort de traction qu'elle exerçait auparavant. L'injection de vapeur et d'eau ou d'eau seule a permis d'appliquer la marche à contre-vapeur non plus seulement aux arrêts très prompts, mais aussi dans le service courant.

On divise les freins : 1° au point de vue de leur mode d'action, en freins agissant isolément sur les véhicules auxquels ils sont appliqués et en freins continus, agissant sur tous les véhicules du train ou, du moins, sur un groupe de véhicules; 2° au point de vue de leur manœuvre, en freins manœuvrés à la main et en freins automatiques.

Les freins qui furent exclusivement employés pendant de longues années et qui continuent à l'être aujourd'hui pour les trains de marchandises sont les freins à sabot, imités de ceux des voitures ordinaires et manœuvrés à la main. Ces freins s'adaptent au tender et à un certain nombre de véhicules, suivant la charge du train et le profil de la ligne. Primitivement, ils étaient commandés par de simples leviers; plus tard sont venus les freins à vis. Divers moyens de déclenchement à la main ou automatique ont été aussi imaginés.

Mais le progrès le plus marquant a été l'adoption des freins continus, placés dans la main du mécanicien, c'est-à-dire de l'agent chargé d'observer les signaux.

L'une des premières dispositions mises en pratique dans cet ordre d'idées consistait à munir chaque véhicule d'un arbre de commande des freins, à accoupler les arbres d'un groupe de véhicules et à faire actionner les freins de chacun des groupes par un agent spécial. Ce système avait l'inconvénient de ne point confier la manœuvre au mécanicien et d'exiger un effort considérable pour le serrage, et surtout pour le desserrage qui ne s'effectuait jamais qu'au prix d'une perte notable de temps. Il reçut cependant des applications assez étendues. Son principal mérite fut de lever tous les doutes sur l'efficacité et l'utilité des freins continus.

Ensuite apparut le frein à chaîne commandé par le mécanicien. Une corde régnant sur toute la longueur du train permettait d'appro-

cher contre les roues des galets qui, en tournant sous l'action du frottement des bandages, mettaient en mouvement la timonerie du frein et produisaient le serrage des sabots. Le frein à chaîne put être rendu automatique pour le cas de rupture d'attelage. Mais il avait le défaut de n'être applicable qu'à des trains courts, d'exclure la modérabilité, de donner toujours le maximum d'effet. Aussi dut-il céder la place aux freins pneumatiques.

Ces freins sont de deux sortes : ils fonctionnent par le vide ou par l'air comprimé. Les uns et les autres peuvent, d'ailleurs, être non automatiques ou automatiques. Un frein est automatique quand il se serre de lui-même, sans l'intervention d'aucun agent, dans le cas où ses organes subissent un dérangement de nature à en compromettre le fonctionnement ultérieur, et notamment dans le cas d'une rupture d'attelage. Il y a là un grand avantage, un surcroît précieux de sécurité pour l'exploitation.

Les freins fonctionnant par le vide ou freins atmosphériques remontent à une époque déjà éloignée. Martin faisait, en effet, breveter, le 10 mars 1860, un récipient placé sous le tender et revêtu d'une membrane flexible qui, se relevant sous l'action du vide, entraînait un piston et actionnait ainsi la timonerie du frein; peu après, le 27 décembre 1860, le même inventeur prenait, avec du Tremblay, un autre brevet pour la production du vide par un jet de vapeur, au lieu et place des pompes reconnues insuffisantes. Des expériences furent entreprises, d'abord sur des modèles, puis sur une machine et sur un tender; malheureusement, elles ne donnèrent pas tous les résultats attendus; quelques organes laissaient à désirer et on craignait de ne pas réaliser un vide suffisant. À cette époque, du reste, le besoin des freins continus ne se faisait pas encore sentir impérieusement. Martin et du Tremblay, renonçant à la lutte, abandonnèrent une invention qui devait être reprise plus tard avec succès dans le frein Smith.

Ce dernier frein a revêtu des formes nombreuses. Parmi les types créés successivement, les uns étaient au vide direct, c'est-à-dire non automatiques; les autres, au contraire, jouissaient de l'automaticité, devaient fonctionner en cas de rupture d'attelage.

Quant au frein à air comprimé ou frein Westinghouse, dont le prin-

cipe est inverse de celui du frein Smith, il débuta aux États-Unis, en 1869. Sous sa première forme, avec sa double conduite, ses deux accouplements à chaque extrémité des véhicules et son réservoir unique adapté à la locomotive, le frein Westinghouse présentait certaines imperfections et n'était pas automatique. Dès 1875, l'inventeur y apporta les modifications voulues et créa un modèle qui, sauf quelques détails, fut successivement employé par un grand nombre de compagnies. Une pompe placée sur la locomotive emmagasinait de l'air comprimé dans des réservoirs disposés sous les véhicules; si le mécanicien laissait échapper une partie de l'air contenu dans la conduite de distribution et produisait ainsi une dépression dans cette conduite, des valves introduisaient l'air des réservoirs dans des cylindres qui commandaient la timonerie des freins et appliquaient les sabots. Le desserrage s'effectuait en rétablissant dans la conduite la pression initiale ou une pression légèrement supérieure, au moyen d'une réserve spéciale d'air comprimé dont était pourvue la machine. Toute rupture d'attelage, entraînant la séparation des tuyaux d'accouplement, faisait fonctionner le frein ainsi combiné; toute solution de continuité dans les appareils, toute fuite quelque peu importante, tout dérangement dans les organes du frein entraînait le serrage. Après l'apparition du système Westinghouse, d'autres freins analogues furent imaginés, notamment par MM. Wenger et Soulerin en France, par MM. Carpenter et Schleifert en Allemagne; le principe restait le même, mais les dispositifs et les organes différaient.

Il y eut aussi des freins mixtes, établis pour fonctionner indifféremment au vide ou à l'air comprimé.

Les services d'exploitation des chemins de fer demandaient avec raison que les freins continus fussent modérables. Plusieurs des systèmes à vide ou à air comprimé furent disposés en vue de satisfaire à cette condition, organisés pour permettre au mécanicien d'obtenir un serrage d'une intensité quelconque, de maintenir ce serrage constant pendant l'intervalle de temps voulu, de le faire varier à tout instant et d'assurer ainsi l'uniformité de vitesse sur les pentes.

Aussitôt que les freins continus pneumatiques eurent pris un caractère vraiment pratique, leur usage se propagea rapidement, tant du

fait de l'initiative privée des compagnies que par suite des prescriptions administratives. La plupart des pays fixèrent d'ailleurs leur choix sur les freins à air comprimé; toutefois l'Angleterre et l'Autriche préférèrent les freins à air raréfié.

Un inconvénient commun à tous les freins pneumatiques et d'autant plus sensible que les trains sont plus longs est la lenteur de la propagation des effets dans la conduite générale : les derniers véhicules sont projetés vers les premiers; il en résulte des chocs, des réactions préjudiciables aux attelages et désagréables pour les voyageurs. Les inventeurs ont cherché à y remédier; accessoirement, ils se sont efforcés aussi d'accroître le rendement des appareils producteurs ou utilisateurs d'énergie.

Ainsi sont nés les freins Westinghouse à action rapide, puis à grande vitesse, qui agissent de deux façons différentes, suivant la dépression : quand celle-ci est graduelle et modérée, l'appareil fonctionne comme le Westinghouse primitif; lorsque la dépression est forte et brusque, la transmission s'accélère. Le système dit à *grande vitesse* améliore en outre le rendement, par la proportionnalité constante qu'il assure entre l'effort retardateur et l'effort d'entraînement. De même que le Westinghouse, le Smith-Hardy à vide automatique a été doué de deux modes d'action distincts. Pour ces freins et pour plusieurs autres (Fives-Lille, Lipkowski, etc.), l'artifice consiste à ouvrir sur la conduite générale des orifices secondaires qui la font communiquer avec l'atmosphère sous l'influence d'une dépression initiale. Malgré tout, le caractère même de la commande pneumatique est incompatible avec la simultanéité absolue du blocage des véhicules. Des inventeurs, en particulier M. Chapsal, ont eu l'idée de recourir à une commande électrique indépendante des appareils pneumatiques qui sont d'ailleurs maintenus; pareille disposition se retrouve dans le frein hydro-électrique Durey, où la pression sur les sabots résulte d'une action hydraulique et non pneumatique. Théoriquement, la transmission électrique est très séduisante; en fait elle exige, pour le maintien de l'automatisme, une dépense considérable d'énergie et donne lieu à de sérieuses difficultés pratiques.

Puisque je viens de parler de l'électricité, il m'est impossible de ne

pas mentionner les recherches longtemps poursuivies en vue de créer des freins purement électriques. L'un de ces freins, imaginé par Achard en 1856 et récompensé en 1865 par l'attribution d'un prix Montyon, a été l'objet d'expériences persévérantes sur le réseau de l'Est. Ces essais n'ont pas abouti au résultat espéré.

Le problème de l'application des freins continus aux trains de marchandises n'est pas entièrement résolu. Pour ces trains, généralement très longs, le défaut de simultanéité du freinage offre de graves inconvénients; une autre difficulté, plus sérieuse encore, tient à la grande variation du poids des chargements. Tant qu'on ne sera pas arrivé pratiquement à la proportionnalité entre le freinage et la masse de véhicule, des chocs dangereux et des ruptures d'attelage resteront inévitables.

Quelques attentats commis dans les trains ont attiré l'attention sur l'opportunité de mettre à la disposition des voyageurs un signal d'alarme au moyen duquel ils pussent réclamer l'assistance des agents, soit en cas d'agression, soit en cas d'accident.

Le premier en date de ces appareils a été appliqué, au cours de l'année 1846, sur la ligne anglaise de Brighton à Chichester; il employait l'électricité comme agent de transmission. D'autres appareils analogues apparurent, en 1852, sur le chemin de fer de Paris à Orléans et, en 1854, sur le chemin de fer du Nord.

Ailleurs, par exemple en Allemagne et sur divers réseaux anglais, on employa des dispositifs beaucoup plus rudimentaires, avec une simple corde placée à l'extérieur des voitures et courant d'une extrémité à l'autre du train, au-dessus des portières.

Quand eurent été adoptés les freins pneumatiques continus, les ingénieurs cherchèrent à tirer parti de la force emmagasinée dans la conduite générale d'air comprimé, pour permettre aux voyageurs d'appeler les agents ou de provoquer eux-mêmes l'arrêt.

Aujourd'hui, les appareils d'intercommunication se sont généralisés. Ils appartiennent au système électrique ou au système pneumatique. Dans le premier cas, une poignée ou un bouton mettent en jeu des sonneries électriques placées à l'intérieur des fourgons; un voyant ex-

térieur peut indiquer le compartiment d'où est parti le signal. L'intercommunication pneumatique comporte la manœuvre d'une poignée; tantôt elle provoque le serrage immédiat des freins, tantôt elle ne détermine qu'un ralentissement et le mécanicien retarde au besoin l'arrêt afin de dépasser un point dangereux; ordinairement, un sifflet ou une trompe repèrent la voiture.

Quelle que soit leur nature, les appareils ne sauraient être d'une efficacité à toute épreuve contre les attentats, car le voyageur risque d'être mis hors d'état d'en user. Mais ils constituent des préservatifs plus sûrs contre certains accidents, en permettant de signaler aux agents des ruptures de pièces, des commencements d'incendie, etc. On a malheureusement à constater trop d'arrêts intempestifs, provoqués sans motif légitime et souvent dangereux par eux-mêmes.

Les précautions se complètent par l'intercalation de glaces dormantes dans les cloisons des voitures à compartiments séparés.

9. Traction électrique sur les chemins de fer. — La traction électrique, qui a déjà pris tant d'importance sur les lignes de tramways, est à peine née pour les chemins de fer. En France, trois chemins électriques de montagne, ceux du Salève, du Mont-Dore et de Cauterets, étaient exploités avant 1900. L'Exposition universelle de 1900 a coïncidé avec des applications remarquables à la section quai d'Orsay-place Valhubert (Compagnie d'Orléans), à la ligne Invalides-Versailles (Compagnie de l'Ouest) et au Métropolitain de Paris. Peu après (1901), une nouvelle ligne électrique desservant Chamonix était ouverte par la Compagnie de Paris à Lyon et à la Méditerranée.

Un mouvement favorable à l'électricité commençait à se dessiner également vers la fin du siècle dans divers pays étrangers, aux États-Unis, en Italie, en Suisse, etc., soit pour éviter la fumée sur des parcours où elle eût présenté trop d'inconvénients, soit pour tirer parti de forces hydrauliques, soit pour concurrencer des services suburbains de tramways.

Cinq voitures automotrices (1 belge, 4 italiennes) et cinq locomotives (3 françaises, 1 allemande, 1 suisse) figuraient à l'Exposition.

Les voitures automotrices étaient toutes à 2 bogies de 2 essieux.

Elles pesaient de 45 à 53 tonnes; ces poids nécessitaient des organes robustes. Deux avaient quatre moteurs; les trois autres n'en portaient que deux actionnant les essieux extrêmes; la puissance totale des moteurs variait de 100 à 300 chevaux.

Établies suivant des types divers qu'expliquait l'époque de leur étude ou la nature de leur service, les locomotives électriques présentaient soit deux essieux moteurs rigides, soit trois essieux rigides dont deux moteurs, soit quatre essieux moteurs rigides, soit quatre essieux moteurs en deux bogies. Leur poids était de 12 à 50 tonnes et la puissance totale de leurs moteurs, de 50 à 1,100 chevaux.

D'une manière générale, les moteurs fonctionnaient au courant continu; la tension de ce courant oscillait entre 240 et 550 volts ou entre 500 et 650 volts, selon qu'il provenait d'accumulateurs ou d'une autre source. Exceptionnellement, une automotrice devait être alimentée par du triphasé à 3,000 volts. Lorsqu'il y avait transport de courant, la disposition la plus souvent adoptée consistait à employer du courant primaire triphasé d'une tension de 5,000 à 20,000 volts, à abaisser cette tension par des transformateurs statiques, puis à convertir le triphasé en continu.

La prise de courant, dans ce dernier cas, se faisait, tantôt par un troisième rail isolé et convenablement protégé, tantôt par des conducteurs aériens et des trolley ou des archets, et le retour par les rails de roulement munis des connexions nécessaires ou par des conducteurs aériens en certains points spéciaux.

Presque tous les contrôleurs étaient du type « série parallèle ». Quelques-uns pouvaient être commandés par des servo-moteurs. L'Exposition témoignait de la généralisation du souffleur électromagnétique.

Les constructeurs avaient, à peu près sans exception, choisi des moteurs à quatre pôles, excités en série et cuirassés. Ordinairement, la commande s'effectuait par des engrenages à simple réduction de vitesse.

Sur le Métropolitain de Paris, le matériel roulant comprend des automotrices à deux essieux, actionnées par deux moteurs de cent chevaux chacun, et des voitures d'attelage, également à deux essieux. Le

courant primaire triphasé à 5,000 volts est transformé en continu à 600 volts. Un troisième rail isolé sert à la distribution pour chaque voie et le retour a lieu par les rails de roulement.

Des dispositions analogues avaient été appliquées au chemin de fer électrique de l'Exposition, dont le public a si justement apprécié le remarquable service.

Il est dès aujourd'hui permis d'augurer un bel avenir pour la traction électrique sur les chemins de fer, surtout dans les régions possédant des forces hydrauliques. Les vitesses actuelles seront sans doute notablement accrues; des expériences successives faites en Allemagne autorisent à cet égard de brillantes espérances, bien qu'elles aient révélé une augmentation rapide des résistances. Mais les voies devront être singulièrement renforcées; la meilleure forme d'utilisation de l'énergie motrice n'est d'ailleurs pas encore déterminée; le progrès entrevu demandera donc de longs délais.

10. Chemins de fer de systèmes divers. — Plus les déclivités d'un chemin de fer augmentent, moins est élevé le poids des trains susceptibles d'être remorqués par les locomotives. Il y a même une limite au delà de laquelle les machines seraient impuissantes à gravir la rampe, n'eussent-elles à traîner que leur propre poids. Bien qu'il existe des inclinaisons de 0,045 sur certaines lignes à traction ordinaire et que les Américains soient même allés à 0,05 et 0,06 dans des installations provisoires, les chiffres de 0,025 à 0,035 peuvent être considérés comme des maxima pratiques suivant la nature et le trafic des voies ferrées. Au delà, l'adhérence ordinaire devient insuffisante et il faut recourir à d'autres moyens de traction.

L'une des premières solutions a été celle de la *traction atmosphérique*, appliquée vers 1844 en Angleterre et en Irlande, puis, trois ans après, sur le chemin de fer de Paris à Saint-Germain, pour la rampe de 0,035 comprise entre Le Pecq et cette dernière ville. Une conduite en fonte bien étanche contenait un piston, auquel on communiquait un mouvement de propulsion en faisant le vide à l'avant; ce piston était lié au premier véhicule par une barre de connexion, qui glissait dans une rainure à clapet ménagée sur la conduite; il

entraînait ainsi le train vers le sommet de la rampe. Souvent, les influences atmosphériques empêchaient la soupape en cuir de fonctionner avec la régularité désirable, et des détresses survenaient, aggravées par le défaut de communications entre les agents du train et les mécaniciens de la machine fixe; d'un autre côté, l'imperfection du vide ne permettait pas de remorquer plus de six à sept voitures.

Comme je l'ai précédemment indiqué, l'idée de la *crémaillère* est due à Blenkinsop (1811). Abandonnée pendant plus de trente ans, cette idée fut reprise aux États-Unis, en 1847, et reçut une application rationnelle sur les rampes de 0,059 du chemin de Madison à Indianapolis. Marsh de Chicago recourut de nouveau à la *crémaillère*, en 1869, pour gravir le mont Washington, près de Boston, avec des rampes variant de 0,12 à 0,38. Entre temps, Riggenbach d'Olten faisait breveter en France (1863) sa *crémaillère* à échelons, sorte d'échelle couchée dans l'axe de la voie; il l'employait, de 1869 à 1871, au chemin du Righi, où les rampes atteignaient 0,25. M. Abt, de Lucerne, inaugura, en 1885, sur une ligne du Harz, un dispositif différent qui comportait une ou plusieurs *crémaillères* taillées dans des barres plates; les dentures des barres multiples étaient chevauchées. De 1886 à 1888, le chemin du Pilate recevait la *crémaillère* Lorcher, faite de deux barres plates dentées vers l'extérieur. À l'Exposition de 1900 figurait la *crémaillère* Strub, utilisée à la Jung-Frau et constituée par un rail Vignole à champignon denté.

Depuis 1870, les chemins de fer à *crémaillère* se sont multipliés. Leur développement à la fin de 1899 était, d'après M. Abt, de 1,180 kilomètres, dont 798 appartenant au système de cet ingénieur, 361 au système Riggenbach et le surplus aux systèmes Lorcher, Strub, etc.

Quel que soit le dispositif, la propulsion est obtenue à l'aide de roues dentées mues par la locomotive et engrenant avec la *crémaillère*. L'énergie peut être demandée à l'électricité. Certaines lignes ont l'adhérence par *crémaillère* sur tout leur parcours; ailleurs, l'adhérence ordinaire et l'adhérence par *crémaillère* alternent selon le profil. Ordinairement, les voitures sont en avant de la machine, à la montée, et portent comme elle des freins rapides et puissants, qui prennent

leurs points d'appui sur la crémaillère. Plusieurs systèmes de freins ont été étudiés pour fonctionner d'une manière automatique par déclenchement, lorsque la vitesse dépasse un maximum déterminé.

Dans le système *funiculaire*, la traction est opérée par une machine fixe actionnant un câble auquel sont fixés les véhicules. Généralement, les plans sont automoteurs; le poids mort du train descendant équilibre le poids mort du train montant, et le moteur n'a à fournir qu'un appoint correspondant à l'excès du poids utile montant sur le poids utile descendant, ainsi qu'aux résistances passives. Parfois, on évite le moteur au moyen de caisses à eau, plus ou moins remplies de manière à donner au train descendant le poids voulu. Ici encore, les véhicules doivent être pourvus de freins puissants à action rapide, pour le cas de rupture du câble. Le nombre des chemins funiculaires est considérable: à la fin de 1899, la Suisse en comptait 25, qui mesuraient 22 kilomètres et dont le premier en date était celui de Lausanne-Ouchy (1871).

Au système funiculaire se rattache une solution, assez critiquable d'ailleurs, qui consiste à élever le train montant à l'aide d'un câble avec poulie de renvoi, sur lequel agit une locomotive descendant la pente. Cette solution utilise à la fois la puissance et le poids de la machine; elle n'est possible que si l'inclinaison reste assez faible pour permettre à la locomotive de remonter le versant.

L'Allemagne a exploité entre Dusseldorf et Elberfeld un plan incliné, sur lequel le train montant et le train descendant, attelés à un même câble, avaient chacun une locomotive. Les deux machines s'équilibrant agissaient, non par leur poids, mais par leur puissance.

Un autre système, qui a été expérimenté en Italie et qui a excité un vif intérêt, est celui de M. Agudio. Son but était de réduire la section, le poids et les résistances propres du câble. Il reposait sur deux principes: 1° l'utilisation, pour la traction, du brin descendant qui travaillait comme le brin montant; 2° l'amplification, dans un rapport arbitraire, de la vitesse de translation du câble. L'action du brin descendant et la transformation des vitesses nécessitaient un mécanisme locomoteur spécial.

Il convient de rappeler encore le dispositif *Fell*, appliqué au passage du Mont-Cenis, avant l'achèvement du tunnel. Dès 1830, Vignole et Éricsson avaient songé à obtenir une adhérence indépendante du poids de la locomotive et proposé dans ce but l'addition d'un rail central saisi latéralement par des roues horizontales. Fell eut le mérite de faire la première application sensée du rail central et d'organiser une exploitation régulière dans des conditions fort difficiles. Après un essai à High-Peak, près de Manchester, il transporta son système au Mont-Cenis, sur des rampes de 0,08.

Parmi les chemins de fer spéciaux se range le *chemin de fer monorail* de M. Lartigue. Le système, ainsi que son nom l'indique, comporte un seul rail. Ce rail unique est porté par des chevalets triangulaires, avec guidages. Les véhicules sont formés de deux parties symétriques assemblées comme des cacolets et roulent sur le rail unique, au moyen de galets verticaux à gorge, tandis que des galets horizontaux, correspondant aux guidages, maintiennent l'équilibre. Des dispositions ingénieuses ont été étudiées pour les changements de voie et pour le passage des voies de terre. Une application de ce système a été faite en Irlande, entre Listowel et Ballybunion; l'inventeur a, en outre, obtenu d'autres concessions, notamment dans le département de la Loire.

Du système Lartigue peut être rapproché le système Langen, qui a été employé pour le *chemin de fer électrique aérien* de Barmen-Elberfeld-Vohwinkel et qui figurait à l'Exposition de 1900. Cette ligne est à deux voies monorails, portées par des piles oscillantes en forme de portique. Les voitures sont suspendues au moyen de deux châssis pivotants, montés chacun sur deux roues dont les mentonnets embrassent le rail et qu'actionne un même moteur électrique à courant continu d'une tension de 600 volts. Un block-system automatique permet de lancer toutes les deux minutes des trains de quatre voitures, à la vitesse de 50 kilomètres.

Girard eut, en 1862, et M. Barre reprit plus tard, avec des perfectionnements de détail, l'idée d'un *chemin de fer glissant* à propulsion hydraulique. Un spécimen de ce chemin de fer fonctionnait en

1889 à l'Esplanade des Invalides. Dépourvus de roues, les véhicules constituent de véritables traîneaux; ils glissent sur une mince couche d'eau comprimée entre leurs patins et les rails. La propulsion est réalisée à l'aide d'eau sous pression, que lancent des ajutages fixes répartis sur la voie et qui vient frapper des turbines à aubes courbes adaptées aux véhicules.

Enfin il y a lieu de citer les *plates-formes mobiles* telles que celle de l'Exposition universelle de 1900. Cette plate-forme, du système Blot-Guyenet-de Mocomble laissait loin derrière elle les essais antérieurs. Le souvenir de son grand et légitime succès est encore présent à tous les esprits. Mon rapport administratif et technique en rappelle la genèse et en donne une description détaillée. Elle se composait d'un trottoir fixe et de deux trottoirs mobiles, respectivement animés d'une vitesse de 3 kilom. 700 et d'une vitesse de 7 kilom. 400 à l'heure; les voyageurs passaient successivement du trottoir fixe au premier trottoir mobile, puis au second, ou inversement. Chacun des trottoirs mobiles était constitué par une chaîne de trucks, les uns à extrémités convexes, les autres à extrémités concaves; ils portaient, à leur partie inférieure, une poutre axiale, qui recevait par adhérence la propulsion de galets moteurs, mis eux-mêmes en mouvement au moyen de treuils électriques. Le courant primaire triphasé à 5,000 volts subissait une transformation en courant continu à 500 volts environ.

11. Tramways. — Les tramways sont des chemins de fer d'une nature spéciale établis, dans la totalité ou la plus grande partie de leur longueur, sur des routes ou chemins; leur plate-forme demeure accessible à la circulation des voitures et des piétons, ou tout au moins à celle des piétons; ils ont pour objet exclusif ou principal le trafic-voyageurs.

Bien que les premières voies ferrées industrielles aient eu pour assiette des voies de terre, on ne saurait faire remonter au delà de 1832 l'origine des tramways, tels que nous les définissons aujourd'hui. À cette époque fut ouverte la ligne de New-York et Harlem; elle ne réussit pas et dut être supprimée. Vingt ans plus tard, les tramways reparurent à New-York, grâce aux efforts intelligents d'un

ingénieur français, M. Loubat, et se propagèrent rapidement dans les grandes villes de l'Amérique du Nord. De retour en France, M. Loubat y introduisit, dès 1853, les chemins de fer américains, par une expérience à laquelle il procéda sur le quai Debilly et qui servit de point de départ à la concession d'une ligne entre Sèvres et Vincennes. Après de nombreuses difficultés, M. Train réussit à les importer, en 1860, sur le sol de la Grande-Bretagne. On sait le développement qu'ils ont pris et les services qu'ils rendent de nos jours, surtout aux habitants des grandes villes et des communes suburbaines. Il n'est plus guère d'agglomération importante dont les rues et la banlieue ne soient dotées de ce mode de locomotion économique et suffisamment rapide. Les tramways envahissent même les campagnes où ils suppléent les chemins de fer d'intérêt local, quand la largeur des routes ou chemins et leur circulation le permettent.

Très simple en apparence, l'établissement de la voie des tramways constitue en réalité un problème délicat. Il faut encastrer les rails dans le pavage ou l'empierrement, respecter le profil normal de la chaussée, éviter les saillies qui donneraient lieu à des accidents ou détérioreraient promptement les voitures ordinaires, tourner dans des courbes à court rayon, couper d'autres tramways, franchir des chemins de fer, etc. Les inventeurs continuent à chercher des solutions économiques, sûres et appropriées aux circonstances locales.

Ne devant pas saillir sur le sol, les voies sont formées de rails avec ornière ou gorge, destinée au passage du boudin des roues; cette ornière est assez profonde pour que le bord extérieur du boudin ne roule pas sur le sol et assez étroite pour que les roues des véhicules ordinaires ne s'y engagent pas. Tantôt on ménage la gorge au laminage, tantôt on la constitue par la juxtaposition d'un rail et d'un contre-rail. Parfois, les boudins sont supprimés sur l'un des côtés de la voiture, afin de faciliter la circulation dans les courbes, et le rail correspondant devient un fer plat.

Les rails se posent directement sur le sol, s'adaptent à des longrines en bois ou reposent sur des traverses; le choix entre ces solutions dépend de la nature du service et de la structure des chaussées. C'est ainsi que les pavages fondés sur béton excluent les traverses et

les rendent d'ailleurs inutiles. Sauf ce cas, les rails-longrines ou les rails posés sur longrines conviennent surtout aux tramways à véhicules légers et n'ayant de boudins que d'un côté; un entretoisement est nécessaire pour maintenir leur écartement.

On supprime souvent les aiguilles mobiles dans les voies de tramways à traction de chevaux. Avec un peu d'habileté, le cocher sait, au moment opportun, imprimer la direction voulue à son attelage. Cependant cette suppression n'est pas générale; il y a des aiguilles manœuvrées à la main et des aiguilles automatiques. Les appareils de la voie comprennent aussi des plaques tournantes.

La tendance des temps modernes à substituer les moteurs mécaniques aux moteurs animés s'est manifestée dans l'industrie des tramways comme dans les autres. À la fin de 1900, sur 5,092 kilomètres de tramways ouverts à la circulation en France, 430 seulement étaient exploités par chevaux; d'autres pays accusent une proportion beaucoup moindre. Parmi les conditions auxquelles devaient satisfaire les appareils mécaniques de traction, quelques-unes méritent d'être rappelées ici : les dégagements de fumée sont inadmissibles à la traversée des villes et ceux de vapeur blanche ne peuvent y être tolérés que dans des limites très restreintes; il faut que les manœuvres soient faciles, les arrêts rapides, l'allure vive ou lente à volonté; un mécanisme bruyant effraierait les chevaux ombrageux; le démarrage sur des rails couverts de boue exige une grande adhérence. Outre les machines à foyer acceptables pour certains services et comportant surtout des générateurs à très petits éléments (Du Temple, Serpollet, etc.), les exploitants ont employé des machines à vapeur surchauffée ou à air comprimé. Ces dernières machines appliquent une idée simple : elles font, au départ ou dans les stations de relais, des approvisionnements de force qu'elles dépensent en route, sans feu, sans fumée, sans escarbilles; dans un cas, la force est emmagasinée au moyen d'eau à 200 degrés et, dans l'autre, au moyen d'air à la pression de 80 atmosphères. Mais c'est principalement à l'électricité que va aujourd'hui la faveur des exploitants : les États-Unis n'emploient pour ainsi dire plus d'autre source d'énergie; l'Allemagne suit leur exemple; en France même, où l'impulsion a été plus lente, la

proportion des tramways électriques atteignait 26 p. 100 dès la fin de 1900.

Quatre procédés distincts peuvent être mis en œuvre pour l'utilisation de l'énergie électrique : ceux des conducteurs aériens, des accumulateurs, des contacts superficiels ou du caniveau.

Très économique, le système du conducteur aérien est le plus généralement employé. MM. Sprague et Van Depoele ont facilité son application en imaginant le dispositif simple du trolley formé d'une perche avec galet de contact à l'extrémité. Les inconvénients du trolley ordinaire dans les courbes ont été atténués par le système Dickinson ou par celui de l'archet. Malgré ses avantages incontestés, le trolley doit quelquefois être proscrit pour des raisons d'esthétique.

Les accumulateurs ne conviennent que dans des cas particuliers et pour des parcours de peu d'étendue. Ils sont lourds et encombrants. Leur remplacement ou leur rechargement périodiques constituent une sujétion fort gênante.

Pour la prise de courant par contacts superficiels, il y a lieu de citer d'abord le système Diatto à conducteurs souterrains et à pavés métalliques insérés dans l'axe de la voie. Un électro-aimant placé sous la voiture aimante des noyaux en fer doux dont sont armés les pavés; ces noyaux attirent des broches en fer baignant dans une éprouvette de mercure et reliées ainsi au câble d'alimentation. Afin d'éviter l'action du magnétisme rémanent, la tête de la broche est constituée par un cône en graphite qui vient toucher une cuvette de même matière sous le noyau du pavé. M. Vedovelli a inventé un système différent, dans lequel la prise se fait par un frotteur glissant sur des plots; ceux-ci sont mis successivement en communication avec le conducteur principal au moyen d'un commutateur, quand la voiture les recouvre. Le procédé des contacts superficiels exige un montage extrêmement soigné.

Le caniveau souterrain avec conducteurs isolés contre lesquels glisse un frotteur passant par une rainure superficielle donne une solution élégante, mais coûteuse. Il permet d'éviter le retour du courant par les rails et de supprimer presque totalement les dérivations qui engendrent des corrosions par électrolyse dans les conduites d'eau ou de gaz; il soustrait aussi les lignes téléphoniques faisant leur retour

par la terre aux perturbations qu'y déterminent les lignes aériennes. Tantôt le caniveau est axial, et deux barres profilées forment alors la rainure; tantôt il est latéral, et la rainure prolonge l'ornièrre d'un des rails, ce qui désencombre la voie publique.

Quel que soit le procédé, le courant qui agit sur les machines est du continu, dont la tension oscille le plus fréquemment autour de 500 volts. Les moteurs ont une puissance individuelle de 25 à 45 chevaux; il y en a deux par voiture automotrice. En ce qui concerne leur nature, le mode de commande et le type des contrôleurs, je ne puis que renvoyer aux indications précédemment données sur les voitures automotrices pour chemins de fer.

Un système funiculaire spécial pour les tramways mérite encore d'être signalé dans cette courte revue des différents modes de traction, car il a été appliqué aux États-Unis, en Australie, en Angleterre et assez récemment à Paris. Sous la chaussée est établie une conduite à l'intérieur de laquelle court un câble sans fin, actionné par une machine fixe. Chaque voiture prend son mouvement sur le câble par l'intermédiaire d'un appareil à mâchoires mobiles (gripp), qui glisse dans une fente ménagée à la partie supérieure de la conduite.

Les châssis des voitures de tramways sont montés, suivant les cas, sur deux essieux conservant leur parallélisme, sur deux essieux susceptibles de prendre des positions radiales, enfin sur des bissels ou des bogies à un ou deux essieux; un type nouveau de bogie, originaire d'Amérique, est le type dit à *traction maximum*, où les roues de l'essieu moteur présentent un diamètre supérieur à celui des roues de l'essieu conducteur, disposition favorable à l'augmentation du poids adhérent et à l'inscription dans les courbes. À la suspension du châssis sur les boîtes s'ajoute souvent une suspension de la caisse sur le châssis; parfois, entre ces deux séries de ressorts en est intercalée une troisième.

Parmi les nombreux modèles de caisses, on constate une prédilection pour le modèle sans impériale, avec plates-formes extrêmes recevant des voyageurs debout. En nombre de cas, une plate-forme centrale, bien abritée, remplace ou complète les plates-formes extrêmes : ce dispositif a pris naissance aux États-Unis et y est usuel. Les

Américains ont aussi imaginé récemment un type de remorque à parois latérales amovibles : ces parois s'effacent pour le service d'été.

Le chauffage est assuré soit par des chaufferettes mobiles garnies de briquettes d'agglomérés, soit par une circulation de vapeur, soit par l'échauffement de conducteurs que traverse un courant électrique. Des lampes à incandescence éclairent les voitures des tramways électriques; à défaut d'électricité, l'éclairage se fait au moyen de lampes diverses analogues à celles des chemins de fer.

Des freins de genres variés procurent un arrêt rapide. La moitié des voitures exposées en 1900 avaient des freins automatiques à air comprimé; une autre voiture était munie d'un frein électrique et d'un frein à vis avec sabots multiples; les dernières présentaient des freins à main commandés par une vis ou par une chaîne s'enroulant autour de la tige de la manivelle.

12. Statistique. — Voici quel a été le développement progressif des chemins de fer dans le monde entier, abstraction faite des lignes industrielles ou exclusivement militaires et des tramways ou des voies ferrées assimilables aux tramways, comme les chemins de fer tertiaires allemands :

DÉSIGNATION DES PAYS.	ANNÉE DE L'OUVERTURE DU PREMIER TRONÇON.	LONGUEUR EXPLOITÉE À LA FIN DES EXERCICES								POPULATION (EN MILLIONS D'HABITANTS).	SUPER- FICIE.	LONGUEUR À LA FIN DE 1900	
		1830.	1840.	1850.	1860.	1870.	1880.	1890.	1900.			par 10,000 habitants.	par myriamètre carré.
		kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.			kil. q.	kil.
EUROPE.													
Allemagne ⁽¹⁾	1835	"	580	6,053	11,724	19,719	33,888	42,869	51,391	56.3	540,700	9.1	9.5
Autriche-Hongrie (et Bosnie - Herzégovine).....	1837	"	144	1,579	4,543	9,589	18,512	26,553	36,883	46.8	675,800	7.9	5.4
Belgique ⁽²⁾	1835	"	335	861	1,729	2,897	4,112	5,207	6,345	6.7	29,500	9.2	21.5
Danemark.....	1844	"	"	217	485	764	1,592	1,986	3,001	2.5	38,500	12.3	7.8
Espagne.....	1848	"	"	28	1,918	5,475	7,480	9,878	13,357	17.7	497,400	7.5	2.7
France.....	1828	38	497	3,010	9,439	17,733	25,925	36,672	42,826	38.5	536,500	11.1	8.0

(1) Y compris les chemins de fer secondaires et les chemins de fer à voie étroite, mais non compris les chemins de fer tertiaires.

(2) Y compris les chemins de fer vicinaux.

⁽¹⁾ Y compris les chemins de fer secondaires et les chemins de fer à voie étroite, mais non compris les chemins de fer tertiaires.

⁽²⁾ Y compris les chemins de fer vicinaux.

DÉSIGNATION DES PAYS.	ANNÉE DE L'OUVERTURE DU PREMIER TRONÇON.	LONGUEUR EXPLOITÉE A LA FIN DES EXERCICES								POPULATION (EN MILLIONS D'HABITANTS).	SUPER- FICIE.	LONGUEUR À LA FIN DE 1900		
		1830.	1840.	1850.	1860.	1870.	1880.	1890.	1900.			par 10,000 habitants.	par myriamètre carré.	
		kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.			kil. q.	kil.	kil.
EUROPE. (Suite.)														
Grande-Bretagne et Irlande (y compris Jersey, Malte et Man).....	1825	91	1,349	10,660	16,797	24,383	28,854	32,726	35,396	41,6	314,800	8,5	11,2	
Grèce.....	1869	"	"	"	"	11	11	776	972	2,4	64,700	4,0	1,5	
Italie.....	1839	"	8	426	1,800	6,208	8,713	12,907	15,787	32,5	286,700	4,8	5,5	
Luxembourg.....	1859	"	"	"	57	149	292	413	466	0,24	2,600	19,4	17,9	
Norvège.....	1853	"	"	"	68	368	1,059	1,562	2,053	2,2	322,300	9,2	0,6	
Pays-Bas.....	1839	"	17	176	335	1,419	1,841	2,610	2,743	5,1	32,500	5,4	8,4	
Portugal.....	1854	"	"	"	137	720	1,206	2,125	2,376	5,4	92,100	4,4	2,6	
Roumanie.....	1860	"	"	"	66	316	1,384	2,494	3,098	5,9	131,300	5,2	2,4	
Russie (et Finlande).....	1838	"	27	500	1,591	11,236	23,524	30,940	48,107	115,6	5,900,300	4,2	0,8	
Serbie.....	1884	"	"	"	"	"	"	540	578	2,5	48,300	2,3	1,2	
Suède.....	1851	"	"	"	531	1,734	5,761	8,018	11,320	5,1	447,900	22,0	2,5	
Suisse.....	1844	"	"	25	1,058	1,442	2,470	3,198	3,783	3,3	41,400	11,4	9,1	
Turquie, Bulgarie et Roumélie orientale.....	1860	"	"	"	66	291	1,394	1,719	3,142	9,7	275,600	3,2	1,1	
TOTAUX ET MOYENNES.....	129	2,957	23,535	52,344	104,454	168,018	223,193	283,524	400,0	10,278,900	7,1	2,8		
AMÉRIQUE.														
Amérique du Nord.	Canada (1).....	1836	"	26	106	3,323	4,211	11,035	21,160	28,410	4,8	8,587,300	59,2	0,3
	États-Unis.....	1827	66	4,534	14,515	49,277	85,151	150,113	263,228 (1)	311,287 (1)	76,1	9,067,400	40,9	3,4
	Mexique.....	1850	"	"	11	32	349	1,120	9,713	15,454	13,6	1,982,800	11,4	0,8
	Terre-Neuve.....	1885	"	"	"	"	"	"	179	1,055	0,21	110,700	50,2	0,9
Amérique centrale.	Costa-Rica.....	1872	"	"	"	"	"	120	241	261	0,24	59,600	10,8	0,4
	Guatemala.....	1880	"	"	"	"	"	45	190	644	1,4	125,100	4,6	0,5
	Honduras.....	1871	"	"	"	"	"	90	90	96	0,59	119,800	1,6	0,1
	Nicaragua.....	1880	"	"	"	"	"	20	146	146	0,50	123,900	2,8	0,1
	Salvador.....	1882	"	"	"	"	"	"	86	156	0,91	21,100	1,7	0,7
Antilles.	Barbade.....	1883	"	"	"	"	"	"	39	39	0,19	400	2,0	9,7
	Cuba.....	1837	"	195	399	603	655	1,382	1,731	1,960	1,6	113,900	12,3	1,7
	Haiti.....	1880	"	"	"	"	"	80	115	225	1,2	28,700	1,9	0,8
	Jamaïque.....	1845	"	"	26	40	40	40	124	298	0,75	11,100	3,9	2,7
	Porto-Rico.....	1885	"	"	"	"	"	"	18	220	0,95	9,300	2,3	2,4
	Trinité.....	1880	"	"	"	"	"	26	87	130	0,27	4,500	4,8	2,9
Amérique du Sud.	République Ar- gentine.....	1857	"	"	"	39	732	2,313	9,255	17,047	4,8	2,885,600	35,6	0,6
	Bolivie.....	1873	"	"	"	"	"	130	209	972	2,2	1,334,200	4,4	0,1
	Brésil.....	1854	"	"	"	295	786	3,500	9,800	14,798	14,3	8,313,400	10,3	0,2
	Chili.....	1852	"	"	"	195	732	1,898	2,928	4,148	3,1	690,300	13,3	0,6
	Colombie.....	1855	"	"	"	79	79	121	380	605	4,0	1,330,800	1,5	0,05
	Équateur.....	1879	"	"	"	"	"	64	300	300	1,4	299,600	2,1	0,1
	Guyane anglaise.....	1864	"	"	"	"	32	32	35	119	0,28	229,600	4,2	0,5

(1) Longueur au 30 juin.

(1) Longueur au 30 juin.

DÉSIGNATION DES PAYS.	ANNÉE DE L'OUVERTURE DU PREMIER TRONÇON.	LONGUEUR EXPLOITÉE À LA FIN DES EXERCICES							POPULATION (EN MILLIONS D'HABITANTS).	SUPER- FICIE.	LONGUEUR À LA FIN DE 1900			
		1830.	1840.	1850.	1860.	1870.	1880.	1890.			1900.	par 10,000 habitants.	par myriamètre carré.	
		kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.		kil. q.	kil.	kil.	
AMÉRIQUE. (Suite.)														
Amé. du Sud.	Paraguay.....	1863	"	"	"	72	72	240	251	0,63	253,100	4,0	0,1	
	Pérou.....	1851	"	"	"	89	732	1,852	1,668 (1)	4,5	1,769,800	3,6	0,1	
	Uruguay.....	1869	"	"	"	"	98	431	1,127	1,605	0,88	186,900	18,2	0,9
	Vénézuéla.....	1866	"	"	"	"	13	126	709	852	2,4	1,027,000	3,5	0,1
TOTAUX ET MOYENNES.....		66	4,755	15,057	53,972	93,682	174,610	323,798	402,746	141,80	38,685,900	28,4	1,04	
AFRIQUE.														
	Congo (État indépen- dant).....	1898	"	"	"	"	"	"	390	14,0	2,252,800	0,3	0,02	
	Égypte (sans le Sou- dan).....	1856	"	"	"	347	656	1,494	1,547	3,392	9,8	994,300	3,5	0,34
	Orange (État libre d').....	1885	"	"	"	"	"	"	581	960	0,21	131,100	45,7	0,73
	Possessions alleman- des (Afrique orien- tale et Sud-Ouest africain).....	1898	"	"	"	"	"	"	300	8,2	1,830,000	0,4	0,02	
Possessions anglaises.	Protectorat de l'Afrique orien- tale.....	1898	"	"	"	"	"	"	582	2,5	730,200	2,3	0,08	
	Cap.....	1860	"	"	"	2	164	1,457	2,745	4,018	2,3	756,800	17,5	0,52
	Lagos et Sierra- Leone.....	1899	"	"	"	"	"	"	286	0,16	19,200	17,9	1,49	
	Maurice.....	1862	"	"	"	"	66	132	148	167	0,38	182,600	4,4	0,09
	Natal.....	1860	"	"	"	3	3	159	517	913	0,93	75,600	9,8	1,20
	Algérie.....	1862	"	"	"	"	517	1,154	2,817	2,948	4,7	600,000	6,3	0,49
Possessions françaises.	Réunion.....	1879	"	"	"	"	"	14	126	126	0,17	2,600	7,4	4,84
	Sénégal.....	1883	"	"	"	"	"	"	264	264	1,8	170,000	1,5	0,16
	Côte des Soma- lis.....	1899	"	"	"	"	"	"	122	0,02	6,000	62,0	2,0	
	Soudan.....	1881	"	"	"	"	"	"	128	241	4,0	832,000	0,6	0,03
	Tunisie.....	1872	"	"	"	"	"	225	260	925	1,7	130,000	5,4	0,71
	Possessions italiennes (Érythrée).....	1898	"	"	"	"	"	"	28	0,33	247,300	0,8	0,01	
	Possessions portugai- ses (Afrique orien- tale et Angola)...	1885	"	"	"	"	"	"	50	842	7,3	2,084,200	1,2	0,04
	République Sud-Afri- caine.....	1887	"	"	"	"	"	"	120	1,935	1,1	308,600	17,6	0,62
TOTAUX ET MOYENNES.....		"	"	"	352	1,406	4,635	9,303	18,439	59,60	11,353,300	3,1	0,16	
ASIE.														
	Chine.....	1876	"	"	"	"	"	7	173	498	399,7	10,968,400	0,01	0,01
	Corée.....	1898	"	"	"	"	"	"	42	5,6	218,600	0,07	0,02	
	Inde portugaise.....	1885	"	"	"	"	"	"	54	82	0,57	4,000	1,44	2,05
	Indes néerlandaises (Java, Sumatra)...	1867	"	"	"	"	109	450	1,361	2,228	29,4	549,500	0,75	0,40
	Japon (y compris Formose).....	1875	"	"	"	"	"	122	2,333	5,858 (2)	46,5	417,400	1,25	1,40

(1) Diminution résultant de la cession faite au Chili en 1883. — (2) Longueur au 1^{er} avril 1900.

DÉSIGNATION DES PAYS.	ANNÉE DE L'OUVERTURE DU PREMIER TRONÇON.	LONGUEUR EXPLOITÉE À LA FIN DES EXERCICES								POPULATION (EN MILLIONS D'HABITANTS).	SUPER- FICIE.	LONGUEUR À LA FIN DE 1900	
		1830.	1840.	1850.	1860.	1870.	1880.	1890.	1900.			par 10,000 habitants.	par myriamètre carré.
		kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.			kil. q.	kil.
ASIE. (Suite.)													
Perse	1888	"	"	"	"	"	"	30	54	9,5	1,626,000	0,06	0,003
Possessions anglaises.	Ceylan	1868	"	"	"	119	200	308	478	3,6	65,700	1,32	0,75
	Inde	1853	"	"	841	4,840	14,729	26,299	39,634	231,1	2,499,300	1,71	1,58
	Protectorat des États malais.	1885	"	"	"	"	"	55	417	0,68	69,600	6,12	6,59
	Inde	1879	"	"	"	"	12	12	27	0,25	500	1,08	5,40
Possessions françaises.	Indo-Chine	1885	"	"	"	"	"	71	236	17,0	149,800	0,13	0,16
	Russie d'Asie	1882	"	"	"	"	"	1,433	8,084	16,8	16,812,200	4,81	0,05
Siam	1897	"	"	"	"	"	"	"	327	6,3	633,000	0,50	0,05
Turquie d'Asie	1860	"	"	"	43	234	372	800	2,760	17,6	1,685,200	1,56	0,16
TOTAUX ET MOYENNES		"	"	"	884	5,302	15,892	32,929	60,725	784,60	35,699,200	0,77	0,17
OCÉANIE.													
Australie { occidentale ...	1873	"	"	"	"	"	115	789 ⁽¹⁾	2,977 ⁽¹⁾	0,18	2,553,500	165,4	0,12
	du Sud	1856	"	"	"	90	323	1,090	2,827 ⁽¹⁾	3,028 ⁽¹⁾	0,36	2,340,600	84,1
Nouvelle-Galles du Sud	1855	"	"	"	24	552	1,368	3,808 ⁽¹⁾	4,658 ⁽¹⁾	1,4	803,800	33,2	0,58
Nouvelle-Zélande	1863	"	"	"	"	45	2,025	3,149 ⁽²⁾	3,701 ⁽²⁾	0,77	270,600	48,1	1,36
Queensland	1860	"	"	"	98	356	1,019	3,448 ⁽¹⁾	4,507 ⁽¹⁾	0,50	1,731,400	90,1	0,26
Tasmanie	1871	"	"	"	"	"	276	643	956	0,17	67,900	56,2	1,40
Victoria	1854	"	"	"	151	531	1,930	3,978 ⁽¹⁾	5,163 ⁽¹⁾	1,2	227,600	43,0	2,26
Hawaï (Îles)	1886	"	"	"	"	"	"	90	161	0,15	17,200	10,7	0,93
TOTAUX ET MOYENNES		"	"	"	363	1,807	7,823	18,732	25,151	4,73	8,012,600	52,9	0,31
RÉCAPITULATION.													
Europe	1825	129	2,957	23,535	52,344	104,454	168,018	223,193	283,524	400,0	10,278,900	7,1	2,8
Amérique	1827	66	4,755	15,057	53,972	93,682	174,610	323,798	402,746	141,8	38,685,900	28,4	1,04
Afrique	1856	"	"	"	352	1,406	4,635	9,303	18,439	59,6	11,353,300	3,1	0,16
Asie	1853	"	"	"	884	5,302	15,892	32,929	60,725	784,6	35,699,200	0,77	0,17
Océanie	1854	"	"	"	363	1,807	7,823	18,732	25,151	4,73	8,012,600	52,9	0,31
TOTAUX ET MOYENNES		195	7,712	38,592	107,915	206,651	370,978	607,955	790,585	1,390,73	104,029,900	5,7	0,76
(1) Longueur au 1 ^{er} juillet. — (2) Longueur au 1 ^{er} avril 1891 et 1901.													

(1) Longueur au 1^{er} juillet. — (2) Longueur au 1^{er} avril 1891 et 1901.

Le chiffre total de 42,826 kilomètres, pour la France, se décompose comme il suit :

Chemins de fer	d'intérêt général	38,044 kilom.
	d'intérêt local	4,782
ENSEMBLE		<u>42,826</u>

En ajoutant à ce chiffre 233 kilomètres de chemins industriels et divers, on arriverait au total de 43,059 kilomètres.

Notre effectif de matériel roulant sur les chemins de fer d'intérêt général ou d'intérêt local était le suivant, au 31 décembre 1900 :

CHEMINS DE FER.	LOCOMOTIVES.	VOITURES À VOYAGEURS.	FOURGONS ET WAGONS.
D'intérêt général	10,529	28,502	287,542
D'intérêt local	582	1,473	7,227

À la même date, le matériel de l'Allemagne, de l'Autriche-Hongrie, de la Grande-Bretagne, de l'Italie et de la Russie se chiffrait comme l'indique le tableau ci-dessous :

PAYS.	LOCOMOTIVES.	VOITURES À VOYAGEURS.	FOURGONS ET WAGONS.
Allemagne	19,478	39,548	423,137
Autriche-Hongrie	7,997	16,467	177,852
Grande-Bretagne	21,195	47,433	727,784
Italie	2,598	7,780	54,587
Russie (y compris la Finlande)	11,471	13,546	284,064

Le capital engagé dans les entreprises de chemins de fer et les recettes brutes en 1900 pouvaient s'évaluer ainsi :

PAYS.	CAPITAL ENGAGÉ au 31 DÉCEMBRE 1900.	RECETTES BRUTES EN 1900.
	francs.	francs.
EUROPE.		
Allemagne	16,085,300,000	2,551,200,000
Autriche-Hongrie (et Bosnie-Herzégovine)	9,562,800,000	958,800,000
Espagne	3,887,000,000	265,400,000
France	17,230,400,000	1,543,700,000
Grande-Bretagne et Irlande (y compris Jersey, Malte et Man)	29,694,000,000	2,646,300,000
Italie	5,381,100,000	318,400,000
Russie (et Finlande)	11,197,300,000	1,493,000,000
Suède	1,009,000,000	125,500,000
Autres pays d'Europe	7,857,100,000	671,200,000
TOTAUX	101,904,000,000	10,573,500,000

PAYS.	CAPITAL ENGAGÉ au 31 DÉCEMBRE 1900. francs.	RECETTES BRUTES EN 1900. francs.
AMÉRIQUE.		
Canada.....	5,171,000,000	366,400,000
États-Unis.....	59,500,000,000	8,562,500,000
Autres pays d'Amérique.....	10,562,500,000	857,800,000
TOTAUX.....	75,233,500,000	9,786,700,000
AFRIQUE.		
Algérie et Tunisie.....	701,500,000	32,500,000
Autres pays d'Afrique.....	3,131,700,000	375,157,000
TOTAUX.....	3,833,200,000	407,657,000
ASIE.		
Inde anglaise.....	5,548,600,000	530,800,000
Autres pays d'Asie.....	3,525,400,000	537,600,000
TOTAUX.....	9,074,000,000	1,068,400,000
OCÉANIE.		
Ensemble.....	3,776,000,000	332,800,000
ENSEMBLE DU MONDE.....	193,820,700,000	22,169,057,000

Quant aux tramways français, leur longueur s'est progressivement élevée de 15 kilomètres en 1855 à 24 kilomètres en 1870, 411 kilomètres en 1880, 1,085 kilomètres en 1890 et 4,231 kilomètres en 1900. Ce dernier chiffre comprend 2,830 kilomètres de tramways pour voyageurs et marchandises, 1,401 kilomètres pour voyageurs et messageries ou voyageurs seuls.

13. Conclusion. — Ces tableaux arides montrent bien l'essor inouï des chemins de fer. Mais ce qu'ils ne disent pas, c'est la révolution matérielle et morale accomplie, grâce au plus merveilleux instrument de civilisation qu'ait jamais créé le génie humain.

Arago demandait avec scepticisme comment deux tringles de fer

parallèles pourraient donner une face nouvelle aux landes de Gascogne. Malgré les pronostics de l'illustre savant, les landes de Gascogne ont reçu le mouvement et la vie. Les régions incultes et inhabitées de l'Amérique se sont transformées; en plein désert, il a suffi de quelques mois pour faire surgir des villes comme Vancouver; de petites bourgades sans importance ont fait place à des centres de premier ordre, tels que Chicago. Bientôt les steppes de la Sibérie seront méconnaissables. Puis un jour viendra où les régions inviolées de l'Afrique centrale ouvriront leurs portes toutes grandes aux idées et au commerce du vieux monde. Nulle part, la colonisation n'a de meilleur pionnier que la locomotive.

Les distances sont pour ainsi dire supprimées; les hommes du Nord et du Midi, de l'Est et de l'Ouest, entrent en relations directes, se mettent en contact les uns avec les autres; tous, depuis les privilégiés de la fortune jusqu'aux plus humbles, contractent l'habitude et le goût des voyages.

Au premier rayon de soleil, les employés, les ouvriers des grandes agglomérations, que le travail a retenus pendant la semaine dans des locaux ou des ateliers privés d'air et de lumière, prennent chaque dimanche leur volée et vont se répandre dans la banlieue, y faire une large provision de santé, y chercher en même temps des plaisirs honnêtes qui élèvent leur âme et leur font oublier les entraînements de la ville. Par un mouvement inverse, les habitants des campagnes envahissent périodiquement les grands centres, dont les fêtes, le luxe et le renom exercent sur eux une véritable fascination.

Les chemins de fer et les tramways permettent, en outre, à beaucoup d'ouvriers d'abandonner les faubourgs malsains, de se loger dans les localités environnantes, d'y trouver l'air et l'espace, de mettre leur famille à l'abri de la promiscuité, si dangereuse au point de vue moral, qui s'impose inévitablement dans les maisons des quartiers populeux.

Plus de famine, plus de disette. Un admirable équilibre tend à s'établir, prenant aux uns ce qu'ils possèdent en surabondance, portant aux autres ce qui leur fait défaut, unifiant les conditions d'existence, améliorant toujours le sort des moins favorisés.

Ici, les amendements et les engrais vont se déverser sur le sol et lui

apportent la fécondité. Là, les matières premières affluent dans de vastes usines, d'où elles sortiront à l'état de produits manufacturés.

La locomotive court à travers les continents, roulant à sa suite des flots de marchandises, mettant la terre en valeur, éveillant les richesses souterraines de leur sommeil séculaire, surexcitant l'industrie, multipliant les relations commerciales, renversant les vieilles barrières séparatives des provinces et des États, créant et alimentant d'immenses marchés, imprimant au mouvement des ports une progression rapide, semant sur sa route la richesse et le bien-être.

Dans cette marche continue vers le progrès, les chemins de fer n'agissent pas seulement par leurs facilités de circulation. Grands consommateurs de métaux, ils font naître les hauts fourneaux et les forges, poussent à l'amélioration incessante des procédés métallurgiques, provoquent la découverte de méthodes nouvelles. L'effroyable appétit de leurs machines fournit aux houillères une base solide d'exploitation, un élément précieux de vitalité.

Chaque jour, l'étude du matériel roulant, des appareils de sécurité, des engins de manœuvre, soulève les problèmes les plus complexes et les plus délicats, dans le domaine de la mécanique ou de l'électricité; les solutions données à ces problèmes ajoutent aux conquêtes de la science.

L'établissement des voies ferrées, la fondation de leurs ouvrages d'art, la construction de leurs gares monumentales, leurs installations gigantesques offrent aux ingénieurs et aux architectes un champ indéfini de recherches et de travaux, élargissent les cadres du génie civil, augmentent ses ressources et ses moyens d'action.

Instruments de guerre redoutables, les chemins de fer sont aussi et surtout des instruments de pacification. Par les rapports étroits qui se nouent entre les peuples, par les liens internationaux qu'engendre la communauté des intérêts commerciaux et industriels, par le contact et le mélange des races, bien des malentendus s'évanouissent, bien des difficultés et des conflits s'aplanissent inévitablement. Certes, l'heure si ardemment attendue de la paix universelle n'est pas encore venue; mais les crises tendent, du moins, à devenir plus rares; les Stephenson, les Marc Séguin et leurs successeurs comptent, à cet égard, parmi les grands bienfaiteurs de l'humanité.

§ 5. MATÉRIEL DE LA NAVIGATION DE COMMERCE.

1. **Marine à voiles.** — Comme le rappelait M. Trogneux dans une intéressante notice historique sur les transports par mer, publiée il y a quelques années, les progrès essentiels du ^{xix}^e siècle, pour la construction des navires à voiles, ont été : l'accroissement de leur longueur, élément primordial de la vitesse; l'augmentation du tonnage, contribuant au même résultat et abaissant le prix du fret; la substitution du fer, puis de l'acier, au bois seul employé antérieurement à la charpente des coques. L'allongement a permis de donner aux voiles des dimensions transversales plus grandes et d'en diminuer la hauteur; cet abaissement des mâtures réduisait le couple d'inclinaison de la voilure et compensait la perte de stabilité due au rétrécissement de la flottaison.

La première ligne de paquebots à voiles entre les États-Unis et l'Europe fut celle de la Boule-Noire, fondée en 1816; la traversée de Liverpool à New-York demandait vingt-trois jours à l'aller et généralement quarante jours au retour. D'autres compagnies se formèrent, en vue des relations régulières de l'Angleterre avec les États-Unis; un peu avant le milieu du siècle, l'une de ces sociétés possédait le plus grand navire de commerce du monde, le *New-World*, jaugeant 1,400 tonneaux. Quant aux transports réguliers entre la France et l'Amérique, ils furent inaugurés en 1822 par Francis Depau. Vers 1850, la durée de la traversée descendait jusqu'à quatorze ou quinze jours.

Au moment où la marine à vapeur commençait à affirmer sa suprématie, les clippers firent leur apparition dans l'Inde anglaise, puis aux États-Unis. Ces navires longs, peu larges, très creux, extrêmement aigus à la proue et à la poupe, avaient une marche fort rapide. Comme l'avant, eu égard à sa forme effilée, aurait pu avoir une tendance à plonger trop profondément dans la lame sous le poids de la cargaison, on transportait vers l'arrière le maître couple du bâtiment et avec lui le centre de gravité de la carène, ainsi que le centre de la charge.

Parmi les premiers clippers, on peut citer le *Great-Republic* de l'Américain Mac Kay. Ce vaisseau en bois mesurait 98 m. 80 de long et

15 m. 35 de large, et déplaçait 5,000 tonneaux; la voilure, répartie sur quatre mâts, présentait une surface de 5,380 mètres carrés, et néanmoins, grâce à son fractionnement, n'exigeait qu'un équipage de 100 hommes et 30 mousses; le grand mât s'élevait à 64 mètres au-dessus du pont. Le *Great Republic* effectua en quatorze jours, c'est-à-dire avec une vitesse de 9 nœuds 6, la traversée de New-York à Londres; il alla ensuite de New-York à San-Francisco en quatre-vingt-neuf jours, avec des vitesses de 14 nœuds pendant des journées entières.

D'autres navires célèbres ayant des dimensions moindres, mais appartenant à la même catégorie, méritent également d'être cités. Tels le *Marco-Polo*, qui franchit en soixante-huit jours la distance de l'Angleterre à l'Australie, le *Sovereign of the Sea*, le *Flying Cloud* et le *Red-Jacket*.

En 1867, la marine à voiles ne comprenait plus guère, pour les services importants vers l'Australie, l'Inde, la Chine, que des clippers en bois, caractérisés par une longueur d'environ cinq fois la largeur et par une voilure étendue.

Malgré la lutte très pénible qu'ils ont à soutenir contre les paquebots à vapeur, dont la marche est beaucoup plus rapide et plus régulière, ces grands voiliers offrent encore des avantages d'économie et conservent une clientèle sérieuse pour le transport à grande distance de certaines marchandises n'exigeant pas une vitesse considérable. Un regain de faveur semble même leur être venu vers la fin du siècle. On a créé des flottes commerciales exclusivement composées de navires à voiles en fer ou en acier, avec appareils à vapeur pour les manœuvres et la manutention : une maison française très connue a des quatre-mâts dont la longueur va à 100 mètres et la portée en lourd à 5,000 tonnes. Allant plus loin, des constructeurs ont livré quelques bâtiments à cinq mâts, atteignant 122 mètres de longueur et 8,000 tonnes de portée en lourd; mais de tels navires deviennent moins maniables et peuvent être exposés à plus de dangers.

À côté des navires au long cours se placent les bateaux plus modestes du grand et du petit cabotage : dans nos parages, ce sont généralement le cotre, le lougre ou chasse-marée, la goélette, le brick-goélette, le brick et le trois-mâts, qui se différencient moins par leurs formes que par leur grément.

Un de nos bâtiments à voiles, dont l'histoire gardera le souvenir, est le *Louqsor*, employé au transport de l'obélisque; il avait fallu en scier l'avant pour y introduire le monolithe. Les Anglais amenèrent l'aiguille de Cléopâtre sur la terre britannique par un procédé différent; ils placèrent le bloc dans un long cylindre, le remorquèrent à la suite de l'*Olga*, durent l'abandonner pendant une tempête, mais parvinrent à le retrouver après plusieurs jours, au large du cap Ferréol.

Si les types de grands bâtiments varient peu d'un pays à l'autre, il n'en est pas de même des petits caboteurs et des bateaux de pêche.

Les modèles qu'on rencontre en faisant le tour du monde présentent une infinie variété, reflètent l'état de la civilisation, s'adaptent aux ressources locales, s'approprient au régime des mers, au genre de navigation et de service; ils forment en quelque sorte une gamme commençant à l'enfance de l'architecture navale; presque tous attestent de l'ingéniosité et sont empreints d'un caractère de véritable originalité.

Une revue sommaire de ces modèles serait particulièrement attrayante, mais sortirait des limites qui me sont imposées. D'ailleurs, je l'ai déjà tentée dans mon rapport sur l'Exposition de 1889, d'après la notice de M. Trogneux et un ouvrage remarquable de l'amiral Pâris.

Sans entrer dans les détails de construction des navires, il est impossible de ne pas rappeler quelques faits d'une importance capitale.

Afin d'empêcher la déliaison et la déformation dans le sens de la longueur, les anciens constructeurs français avaient imaginé le système de la charpente oblique. Ils plaçaient obliquement les bordages intérieurs ou vaigrés suivant les directions où le raccourcissement tendait à se produire; d'autres pièces croisaient les premières dans une direction perpendiculaire, pour résister à l'allongement. Plus tard, cette pratique fut abandonnée, et les conseils de savants ou d'ingénieurs éminents ne réussirent pas à la faire reprendre avant le xix^e siècle. C'est en 1810 que sir Robert Seppings, directeur des constructions navales à Chatham, revint hardiment au principe des pièces diagonales et l'appliqua, tout à la fois, à l'œuvre vive ou partie immergée de la

carène et à l'œuvre morte, entre les ponts et les sabords ; la déformation, l'arc des grands bâtiments fut ainsi considérablement diminué. En même temps, Seppings supprima, dans la partie inférieure de la membrure, les mailles, c'est-à-dire les alternances de plein et de vide où s'accumulait une eau putride, au fond de la cale ; il tint à avoir une masse compacte de bois depuis la quille jusqu'aux environs de la ligne de flottaison ; du goudron, injecté à l'aide de pompes foulantes, venait remplir tous les interstices. Dès 1815, le baron Charles Dupin consacra à ces perfectionnements un mémoire, qui fut peu remarqué en France et obtint au contraire un réel succès en Angleterre. Cependant le progrès finit par s'accomplir chez nous comme au delà de la Manche, et, lors de l'Exposition de 1844, le baron Dupin, rapporteur du jury, put constater que la charpente oblique était devenue d'un usage général pour nos bâtiments de guerre.

Un autre fait essentiel a été le remplacement progressif du bois par le métal. Il semble que le premier bâtiment en fer soit dû à Wilkinson (1787) : c'était un simple chaland. En France, M. Cavé établit vers 1820, sur la Seine, un chantier où se construisaient des bateaux métalliques pour la navigation fluviale. À la même époque, l'ingénieur anglais Fairbairn entreprenait ses recherches persévérantes sur la structure des navires en fer. Mais le métal ne commença à s'emparer réellement du matériel de navigation maritime qu'à partir de 1838.

Le fer se prêtait mieux que le bois à la variété dans les formes, à l'emploi judicieux des matériaux ; il donnait des coques plus solides et plus légères : le poids de coque, qui, avec le bois, ne s'abaissait guère au-dessous de 45 à 50 p. 100 du déplacement, descendit à 35 p. 100 environ. En outre, le fer durait plus longtemps ; son entretien n'exigeait pour ainsi dire que des grattages et de la peinture. À la vérité, les bâtiments en fer étaient un peu plus coûteux ; toutefois les progrès de la métallurgie et la difficulté sans cesse croissante de trouver des pièces de bois d'un fort équarrissage atténuaient chaque jour davantage la différence de prix.

Pendant un certain temps, surtout en France, on a reproché aux navires en fer de se salir rapidement, d'avoir bientôt leur carène recouverte de dépôts marins et de perdre ainsi leurs qualités de marche,

ce qui obligeait à les faire entrer souvent au bassin. Lors de l'Exposition de 1867, le rapporteur de la marine militaire, M. de Fréminville, exprimait encore très nettement ses préférences pour les carènes en bois doublées de cuivre. Malgré tout, le fer, puis l'acier ont fini par régner en souverains maîtres pour les grands bâtiments à vapeur et même par envahir la navigation à voiles.

Un reproche également adressé au métal était de rendre singulièrement plus difficile l'aveuglement des voies d'eau. Pas plus que le précédent, ce grief n'a pu empêcher la transformation de s'accomplir.

Tout d'abord, les constructeurs copièrent la structure des navires en bois et donnèrent à la coque la rigidité voulue, à l'aide de membrures transversales. Plus tard, Scott Russell imagina le système longitudinal et en fit application au *Great-Eastern*, bâtiment colossal de 207 mètres de longueur, 25 mètres de largeur et 18 mètres de creux. Ce système consiste à chercher la rigidité dans des lisses disposées longitudinalement et susceptibles de résister aux efforts de flexion. Il reçut une consécration éclatante pendant les dures épreuves auxquelles fut soumis le *Great-Eastern*. Néanmoins on n'a pu l'adopter intégralement; les constructeurs militaires, comme les constructeurs civils, ont reconnu la nécessité d'un système mixte : en effet, les navires de guerre, chargés par l'artillerie et la cuirasse, demandent de la rigidité transversale, et, d'autre part, les navires de commerce auraient péché par une insuffisance d'épaisseur.

Le remplacement du fer par l'acier remonte à trente ans. De Bussy, ingénieur de la marine française, en fut l'initiateur (1873), et l'Angleterre ne tarda pas à suivre l'exemple. Maintenant, l'acier s'obtient à bas prix; sa résistance, jointe à une homogénéité et à une élasticité parfaites, a permis de réduire encore le poids des coques et d'accroître leurs dimensions. Plus malléable que le fer, il atténue les avaries dues aux échouements et aux abordages. À la vérité, l'eau de mer le corrode davantage; mais c'est un mince inconvénient, eu égard aux transformations périodiques du matériel. L'acier coulé s'est, d'ailleurs, substitué à l'acier forgé, pour les grosses pièces.

Ces brèves indications sur les navires métalliques sont surtout applicables au matériel de la navigation à vapeur. Je ne pouvais ce-

pendant me dispenser de les fournir ici, puisqu'on fait des voiliers en métal.

En dépit des constructions nouvelles, la navigation à voiles n'a cessé de perdre du terrain devant la navigation à vapeur, ainsi que le montre le tableau suivant, extrait du rapport de M. Estier sur l'Exposition de 1900 :

PAYS.	1870.		1880.		1890.		1900.	
	NAVIRES.	TONNEAUX.	NAVIRES.	TONNEAUX.	NAVIRES.	TONNEAUX.	NAVIRES.	TONNEAUX.
Angleterre	23,165	6,993,153	18,352	5,486,666	11,704	3,770,748	7,307	2,583,362
États-Unis.....	7,025	2,400,607	5,968	2,048,975	5,191	1,524,445	3,204	1,191,173
Norvège	3,652	989,882	4,160	1,371,721	3,296	1,266,197	2,117	917,641
Allemagne.....	4,320	1,046,044	3,113	953,856	1,636	666,681	908	521,587
Italie.....	3,395	907,570	2,936	913,782	2,387	654,909	1,478	466,518
France.....	4,668	891,828	2,772	541,853	1,771	309,349	1,222	292,198
Suède.....	1,930	340,185	1,919	399,237	1,768	359,288	1,339	257,273
Espagne.....	3,036	546,507	1,578	325,036	1,364	254,111	995	139,714

Au cours des trente dernières années du siècle, le nombre des voiliers, dans les huit pays ci-dessus désignés, s'est réduit de 64 p. 100 et leur tonnage de 55 p. 100. La différence entre ces deux chiffres tient à l'augmentation du tonnage moyen des navires.

2. Marine à vapeur. — Depuis Papin, le problème de la navigation à vapeur était l'objet d'études suivies. Fulton, mécanicien en Pensylvanie, le résolut pratiquement au début du XIX^e siècle. Venu à Paris en 1802 et secondé par Livingston, ambassadeur des États-Unis, Fulton lança sur la Seine un bateau capable de filer trois nœuds environ, puis adressa à Napoléon I^{er}, qui préparait alors une descente en Angleterre, des propositions trop tardives pour être acceptées. Revenu dans son pays, il équipa le *Clermont* à New-York et y installa une machine de 20 chevaux construite à Soho par la société anglaise de Watt et Boulton. Le bateau commença en 1807 ses voyages sur l'Hudson; un premier trajet entre New-York et Albany, distants de 120 milles, n'exigea pas plus de trente-deux heures à l'aller et trente heures au retour. Cette expérience était décisive; Fulton avait vaincu toutes les difficultés pour l'installation de la machine à bord, pour la transmis-

sion de la force au propulseur, pour le choix des dispositions propres à loger l'appareil moteur et le charbon en conservant les espaces nécessaires à la manœuvre, aux passagers et aux marchandises. De tous côtés, en Amérique, des associations puissantes se formèrent dans le but d'organiser des services réguliers : la navigation à vapeur se trouvait définitivement fondée.

En 1812, Bell et Thomson construisirent, sur la Clyde, le bateau à vapeur *la Comète*, qui réussit également et inaugura, dans la Grande-Bretagne, les applications du nouveau mode de transport. Dès 1818, la navigation à vapeur était employée sur mer.

Le premier propulseur fut la roue à aubes, que les Romains avaient déjà eu l'idée de substituer aux rames. Très simples de leur nature, les roues ont reçu presque immédiatement leur forme définitive. On a été de suite aussi conduit à les placer de part et d'autre du navire, aux extrémités d'un arbre transversal : cette disposition est restée d'un usage général, sauf pour certains bateaux de rivière dont la largeur doit être faible et qui ont les deux roues, parfois une roue unique, à l'arrière. Le mérite des roues à aubes est de diminuer un peu le roulis, de ne pas occasionner les mêmes trépidations que l'hélice, de réduire le tirant d'eau, avantage précieux pour la navigation fluviale. En revanche, elles présentent certains inconvénients. Tout d'abord, elles ne permettent pas les grandes vitesses de piston et exigent par suite des machines lourdes; on a cherché à y remédier au moyen de commandes par engrenages, mais cette solution est peu favorable à un bon rendement mécanique. D'un autre côté, alors que le vent pourrait procurer une économie de charbon, elles créent une résistance considérable, à laquelle il serait impossible de se soustraire sans les affoler ou sans démonter certaines pales, opération longue et délicate; en cas de roulis, elles sortent de l'eau et s'y enfoncent alternativement, ce qui provoque dans le fonctionnement de la machine des irrégularités fâcheuses. Enfin, au point de vue militaire, elles ont le défaut d'être exposées aux projectiles, de placer également dans une position dangereuse certains organes de la machine et de gêner la distribution des pièces d'artillerie.

Hooke, Daniel Bernouilli, Paucton, William Littleton, Dallery, les américains Stevens père et fils, les anglais Shorter et Samuel Brown, le capitaine Delisle, Sauvage, les frères Bourdon, doivent être cités comme des précurseurs pour l'hélice, que l'anglais F.-P. Smith et le capitaine suédois Ericsson créèrent presque simultanément.

Smith, de Middlesex, commença par encadrer horizontalement à l'arrière de la carène une vis d'Archimède en bois, faisant deux révolutions complètes. Un accident ayant amené la rupture d'une des révolutions de la vis, il constata que le navire prenait plus de vitesse : ce fut pour lui un trait de lumière et l'origine du dispositif consistant à n'employer que des fractions d'hélice, accolées comme des ailes de moulin. D'expérience en expérience, Smith se hasarda à affronter la mer, éveilla la sollicitude de l'amirauté anglaise et leva tous les doutes par la construction de l'*Archimède* (237 tonneaux), qui fila près de 10 nœuds et effectua en vingt heures la traversée de Gravesend à Portsmouth, malgré le vent et la marée (1838).

Quant à Ericsson, il avait également entrepris ses essais en Angleterre (1837). Peu encouragé dans ce pays, il se rendit aux États-Unis sur le *Robert Stockton*, mû par son propulseur, que les Américains adoptèrent avec enthousiasme. La découverte d'Ericsson se différenciail de celle de Smith en ce qu'au lieu de conduire l'hélice par l'intermédiaire d'engrenages, il imaginait du même coup un moteur à action directe.

Entre autres avantages, l'hélice a celui d'être entièrement sous l'eau et d'avoir son axe assez bas pour que la machine soit mieux abritée contre les coups de l'ennemi; elle n'apporte aucune entrave à la distribution de l'artillerie sur le navire; il est facile de l'affoler ou de la masquer derrière l'étambot si elle n'a que deux ailes, quand on veut marcher à la voile; elle est moins volumineuse que les roues, agit plus également malgré le roulis et resserre le champ des évolutions.

Aujourd'hui, les hélices ont de deux à quatre ailes. La disposition comportant quatre ailes à 90 degrés s'est répandue en même temps que l'emploi de la voile devenait exceptionnel dans la marine de guerre comme sur les paquebots. Divers progrès ont été réalisés depuis l'ori-

gine : la fraction de surface hélicoïdale a subi des réductions successives; on est arrivé à des rapports plus convenables entre le pas et le diamètre.

D'abord simples, les hélices sont maintenant jumelées dans la plupart des cas. C'est vers 1862 que le système des hélices jumelles paraît avoir été définitivement proposé en Angleterre. Ses adversaires lui reprochaient à l'origine de nécessiter des mécanismes moteurs trop compliqués; on ne l'admettait guère que pour les navires à faible tirant d'eau et à grande vitesse; mais il a peu à peu fait son chemin. Ce système permet de fractionner la force motrice et de réduire le danger d'une immobilisation du navire par avarie à la machine; il se prête à l'établissement, suivant l'axe, d'une cloison étanche, c'est-à-dire à une amélioration sérieuse du cloisonnement de sécurité; enfin il facilite l'évolution dans de petits espaces.

Les machines motrices doivent satisfaire à des conditions diverses et souvent fort difficiles. Ces sujétions ont engendré plusieurs types qui, au point de vue cinématique, diffèrent des modèles ordinairement usités dans les autres applications de la vapeur.

Il faut avoir des machines aussi légères et aussi peu encombrantes que possible, afin de laisser plus de marge pour le tonnage utile du navire. Mais il n'en importe pas moins que l'ensemble de l'appareil offre une base ou un empattement assez large pour ne pas déformer la coque et assez rigide pour rester indépendante des déformations dues à d'autres causes. Un excès de solidité, relativement aux dimensions adoptées à terre, est indispensable eu égard aux vibrations que subissent les moteurs à bord des bateaux, ainsi qu'à la nécessité de prévenir les réparations et les interruptions de service en cours de route. Le même motif exige des pièces d'une confection très soignée, faites avec des matériaux de la meilleure qualité.

Le combustible doit être économisé, et par conséquent la vapeur employée à haute pression, à large détente et à condensation. Cette obligation s'impose surtout pour les longues traversées; en pareil cas, les approvisionnements à embarquer sont considérables; chaque tonne de charbon que l'on peut éviter de prendre au départ donne en béné-

fice non seulement sa propre valeur, mais encore, ce qui a souvent plus de prix, le montant du fret de la marchandise chargée à sa place.

On comprend que la condition de réduire le poids et l'encombrement des machines motrices et celle d'y utiliser la vapeur avec la plus stricte économie se concilient mal entre elles : en effet, les moteurs les plus légers sont ceux qui fonctionnent à très haute pression, sans détente ni condensation, et à grande vitesse, tandis qu'au contraire les moteurs les plus économiques marchent à pression moindre, à large détente, à condensation et à vitesse plus faible. Aucune solution type, faisant une juste part aux deux nécessités qui viennent d'être rappelées, ne saurait être applicable dans toutes les circonstances; il n'existe que des solutions d'espèce commandées, en chaque cas, par le service spécial auquel est appelé le navire.

Du reste, sur les conditions maîtresses de légèreté du moteur et d'économie du combustible s'en greffent d'autres plus ou moins impérieuses, plus ou moins spéciales à certains genres de bâtiments ou de navigations, dont l'examen sortirait du cadre de cette publication.

Jusqu'en 1840, les machines fonctionnaient exclusivement à basse pression, c'est-à-dire à moins d'une atmosphère et demie de pression totale. Puis on passa successivement à deux, deux et demie et même un peu plus. Mais les difficultés pratiques augmentaient avec la pression, parce que l'eau de mer employée à l'alimentation des chaudières les incrustait plus abondamment. Une sorte de révolution se produisit dans la navigation maritime, le jour où y furent introduits le condenseur par surface (Hall, 1832) et l'alimentation monohydrique : de ce moment, la suppression ou la réduction notable des incrustations permirent de marcher à telle pression initiale qui paraissait le plus convenable et de pousser très loin la détente. Ainsi apparurent dans la marine les machines à cylindres combinés : machines Woolf, machines compound à réservoir intermédiaire et à cylindres indépendants. C'est au type compound que s'arrêtèrent, pendant plusieurs années, presque tous les pays; les premières machines de ce genre, dont le principe est dû à Hornblower (1781), furent construites par John Elder, de Glasgow, et par Benjamin Normand, du Havre, vers 1850; elles se répandirent promptement en Angleterre, plus lente-

ment en France, où Dupuy de Lôme les appliqua le premier à la marine militaire et créa le modèle à trois cylindres, si fréquemment reproduit depuis. Allant plus loin, Benjamin Normand fit breveter, en 1871, un système de machine à triple expansion, qui comportait la détente dans trois cylindres successifs; les moteurs à triple expansion débutèrent en 1874, au delà de la Manche, grâce à l'initiative de John Elder, et y prirent un rapide essor; bien que plus difficilement acceptés chez nous, ils s'étaient imposés à nos constructeurs dès avant 1889. Vers cette époque, l'Angleterre abordait la quadruple expansion. Une nouveauté très justement remarquée à l'Exposition universelle de 1900 était l'emploi des turbines à vapeur, et spécialement des turbines Parsons d'une grande puissance, dont la légèreté, les dimensions restreintes, le fonctionnement silencieux, l'extrême souplesse d'allure et l'absence de vibrations ont fait concevoir au jury les plus belles espérances.

Au point de vue de la transmission du mouvement des pistons à l'arbre de couche, les moteurs peuvent être divisés en cinq groupes : 1° machines à balancier (balancier supérieur; balancier inférieur); 2° machines oscillantes (oscillante verticale droite; oscillante verticale renversée ou à pilon; oscillante inclinée droite; oscillante inclinée renversée; oscillante horizontale); 3° machines à bielle directe (horizontale; verticale droite; verticale renversée ou à pilon; inclinée droite; inclinée renversée); 4° machines à bielle en retour (horizontale; verticale droite ou à clocher; verticale renversée ou à pilon); 5° machines à fourreau (horizontale; verticale droite; verticale renversée; inclinée droite; inclinée renversée). Les machines à pilon, dont le premier type a été établi en Écosse, ont constitué un grand progrès, en diminuant l'encombrement et en assurant une usure régulière des pistons et des cylindres, que la pesanteur ne tendait plus à ovaliser comme dans les machines horizontales.

Primitivement, les générateurs consistaient en chaudières à bouilleurs. Les bouilleurs furent plus tard remplacés par des chaudières tubulaires à enveloppe parallélipipédique, dont le timbre s'éleva progressivement à 2 kilogr. 25 en sus de la pression atmosphérique. Puis l'enveloppe devint cylindrique, seule forme capable de résister aux

pressions croissantes qu'exigent les machines modernes et qui atteignent 12 ou 13 kilogrammes. Ces pressions nécessitant des épaisseurs considérables de métal, les appareils se faisaient lourds et encombrants; il fallut chercher une solution plus satisfaisante dans l'emploi des chaudières à tubes d'eau, qui eurent comme prototype la chaudière Belleville et qui fournirent d'ailleurs des garanties précieuses, au point de vue du danger d'explosion. Dans un ordre d'idées un peu différent, la marine de guerre dut même, pour certains de ses bâtiments, recourir aux générateurs à très petits tubes, Du Temple et autres, doués d'une extrême puissance de production, mais ne donnant tout leur rendement qu'à l'aide du tirage forcé.

Quelques chiffres mettront bien en lumière les progrès réalisés depuis l'origine. Les machines à balancier pesaient 700 kilogrammes et consommaient de 2 kilogr. 5 à 3 kilogrammes de charbon par cheval indiqué. Quand furent adoptées les machines à connexion directe, le poids s'abaissa, par suite de l'augmentation du nombre de tours et de la pression; mais la dépense de charbon resta sensiblement la même. Avec les machines à hélice, on put, grâce à des pressions plus élevées, réduire le poids à 220 kilogrammes et la consommation à 1 kilogr. 8, quelquefois même 1 kilogr. 65. L'introduction du système Woolf, des condenseurs à surface et des pressions de 4 kilogrammes fit tomber la dépense de combustible à 1 kilogramme et au-dessous, le poids de l'appareil étant inférieur à 200 kilogrammes. Des économies nouvelles de charbon furent procurées par la triple détente; la dépense de combustible put descendre à 700 grammes environ. Enfin, pour les machines des navires à grande vitesse, les ingénieurs parvinrent à ne pas dépasser le poids de 80 kilogrammes par cheval, en portant le nombre de tours par minute à 130 ou 150, en utilisant la vapeur à très haute pression, en construisant toutes les pièces mobiles avec de l'acier creux, en recourant au tirage forcé; le poids des machines de torpilleurs baissa même jusqu'à 35 ou 36 kilogrammes.

La substitution de l'acier au fer s'est franchement accentuée à partir de 1882. D'après les statistiques de la Grande-Bretagne, les navires en acier représentaient, dès 1889, 94 p. 100 du tonnage total

des navires construits dans ce pays. Sans reproduire les considérations précédemment développées au sujet des avantages de l'acier, je rappelle que ce métal a donné une économie moyenne de 15 p. 100 sur le poids des parties métalliques de la coque ou de 10 à 12 p. 100 sur le poids total du navire emménagé (machines non comprises). Ses qualités ont, d'ailleurs, facilité l'accroissement des dimensions attribuées aux navires et permis de revenir progressivement, dans des conditions beaucoup plus favorables, au déplacement du *Great-Eastern*.

Des augmentations incessantes se sont produites dans la vitesse et davantage encore dans la puissance des machines. L'histoire de la navigation transatlantique offre l'exemple le plus saisissant de ces transformations du matériel; il ne sera pas inutile d'en rappeler quelques faits essentiels.

Les Anglais avaient tenté, de 1828 à 1835, divers essais de navigation entre la Grande-Bretagne et l'Amérique; mais ces tentatives s'étaient terminées par un échec financier. Comprenant tout l'essor que la vapeur imprimerait aux transactions commerciales, le Gouvernement britannique se décida en 1838 à allouer des subventions aux armateurs qui entreprendraient le transport des dépêches. Deux ans après furent créées la Compagnie Royal West India Mail, dont la flotte se composait de bateaux à roues donnant des vitesses inférieures à 6 nœuds, et la Compagnie Cunard, qui établit une ligne entre Liverpool et Halifax, puis entre Liverpool, Boston et New-York; un diagramme annexé au rapport de M. Estier sur l'Exposition de 1900 accuse, pour les meilleurs navires de cette dernière compagnie, en 1848, un tonnage de 1,800 tonnes, une puissance de 1,000 chevaux et une vitesse de 11 nœuds 4.

Au moment même où se constituaient les premières grandes compagnies anglaises, un crédit de 28 millions était ouvert au Ministre de la marine de France, pour la construction de dix-huit bâtiments à vapeur devant effectuer la navigation transocéanienne. Ces premiers paquebots donnèrent des résultats peu satisfaisants; en 1847, le Gouvernement fit appel à de nouvelles sociétés commerciales, afin de leur confier l'exploitation de quatre lignes partant du Havre, de Saint-Nazaire, de Bordeaux, de Marseille, vers New-York, Rio-de-Janeiro

et la Martinique. De nouveaux insuccès empêchèrent de reprendre la question avant 1857. À cette époque, le Gouvernement accorda un subside de 14 millions pour trois lignes entre la France, New-York, les Antilles et le Brésil : la Compagnie des Messageries impériales reçut, par décret du 19 septembre 1857, la concession des lignes de Bordeaux et de Marseille au Brésil; un autre décret, du 27 février 1858, confia le service du Havre à New-York et de Saint-Nazaire aux Antilles à la Compagnie Marziou, qui se désista en faveur de la Compagnie générale transatlantique. Celle-ci vit sa concession définitivement réglée le 19 février 1862; bientôt, elle envoyait à la Martinique, à Cuba et au Mexique la *Louisiane*, paquebot en fer armé d'une machine de 2,000 chevaux, qui franchit en treize jours la distance de 3,560 milles séparant Saint-Nazaire de Fort-de-France; on était déjà loin des bâtiments d'une force moyenne de 150 chevaux, dont la marine militaire s'enorgueillissait en 1838. Quelques années plus tard, la Compagnie générale transatlantique possédait le *Napoléon III*, superbe navire à roues de 6,000 tonneaux, mû par une machine de 3,000 chevaux, et le *Pereire* (1866), paquebot à hélice, qui allait de Brest à New-York en neuf jours et demi, fournissant une vitesse de 13 nœuds 5; aucun autre paquebot ne fut plus rapide jusqu'en 1877.

La Compagnie anglaise Cunard avait la *Bothnia* et la *Scythia*, d'un tonnage supérieur à celui du *Pereire*, mais d'une vitesse légèrement moindre. Deux sociétés britanniques rivales, l'*Inman* et la *White Star Line*, lancèrent, l'une, le *City of Berlin*, l'autre, l'*Adriatic*, le *Celtic* et le *Britannic* (138 mètres; 4,000 chevaux), qui arrivèrent à 15 nœuds. Puis la Compagnie Guion, également d'Angleterre, atteignit 15 nœuds 5 et 16 nœuds, avec l'*Arizona* et l'*Alasca*.

Ainsi distancée, la Compagnie transatlantique prit, en 1883, l'engagement d'aller à 17 nœuds 5 aux essais et à 15 nœuds de moyenne annuelle. Dès 1881, elle avait mis en chantier la *Normandie* (144 mètres; 9,710 tonneaux de déplacement; 6,500 chevaux): ce navire fila 17 nœuds 25 aux essais et fournit d'utiles indications pour l'étude des projets de nouveaux bâtiments, la *Champagne*, la *Bretagne*, la *Bourgogne*, la *Gascogne* (155 mètres; 10,000 tonneaux

de déplacement; 9,000 chevaux), qui donnèrent aux essais près de 19 nœuds et en service courant 16 nœuds 25 à 17 nœuds 5; le trajet du Havre à New-York pouvait, de la sorte, s'effectuer en huit jours et souvent en sept jours. Un pas de plus fut franchi avec *la Touraine*, bâtiment mis à flot en 1891 et dépassant d'un nœud la vitesse du type précédent (164 mètres; 11,673 tonneaux de déplacement; 12,000 chevaux).

Vers la même époque, la Compagnie Cunard comptait dans sa flotte l'*Umbria* et l'*Etruria*, qui obtenaient des vitesses de 17 nœuds 5 et 17 nœuds 75 pendant des traversées entières; la Compagnie Inman avait le *City of New-York* et le *City of Paris* (170 mètres), réalisant 19 nœuds.

À côté de la Compagnie transatlantique, celle des Messageries maritimes, la plus importante des sociétés françaises de navigation, ne restait pas inactive. De 8 ou 9 nœuds en 1854, elle passait : à 10 nœuds 5 aux essais avec les vapeurs du type *Guienne* (1860), à 13 nœuds avec l'*Hoogly* (1866), à 14 nœuds avec l'*Iraouaddy* (1872), à 15 nœuds avec le *Natal* (1883), à 17 nœuds avec la *Plata* (1886), à près de 18 nœuds avec l'*Australien* (1889; 147 mètres entre perpendiculaires; 10,300 tonneaux de déplacement; 7,000 chevaux).

Hambourg et Brême avaient vigoureusement engagé la lutte. En 1900, le paquebot *Deutschland*, de la Hamburg American Line, accomplissait la traversée la plus rapide, parcourant à la vitesse moyenne de 23 nœuds 36 les 2,982 milles compris entre Sandi Hook et Plymouth.

Le tableau suivant donne les caractéristiques de quelques paquebots transatlantiques à grande vitesse, mis en service pendant les dernières années du XIX^e siècle ou au début du XX^e :

NAVIRES.	PAYS.	COMPAGNIES.	DATES.	LONGUEUR.	LARGEUR.	CHEUX.	DÉPLACEMENT.	PUISSANCE.	VITESSE MOYENNE.
				m.	m.	m.	tonneaux.	chev.	nœuds.
<i>Savoie</i>	France	Compagnie générale transatlantique.....	1900	177 00	18 20	12 00	15,400	22,000	20,00
<i>Kaiser Wilhelm der Grosse</i>	Allemagne.	Norddeutscher Lloyd à Brême.....	1897	197 70	20 10	13 10	21,000	29,000	21,50
<i>Kronprinz Wilhelm</i>	Idem.	Idem.....	1901	202 18	20 10	13 10	21,400	33,000	22,00
<i>Kaiser Wilhelm II.</i>	Idem.	Idem.....	1901	215 34	21 95	13 46	26,200	44,000	22,00
<i>Deutschland</i>	Idem.	Hamburg-Amerika-Linie...	1900	209 00	20 42	13 42	23,800	37,000	22,00
<i>Lucania</i>	Grande-Bretagne.	Cunard, à Liverpool	1893	189 60	19 85	12 65	18,200	30,000	20,25
<i>Océanie</i>	Idem.	White Star, à Liverpool...	1899	214 57	20 85	14 94	28,700	27,000	19,25

Aujourd'hui, le voyage de Londres à Bombay n'exige plus que quatorze jours; celui de Londres à Shang-Haï, trente-deux jours; celui de Londres en Australie, trente et un jours; celui de Saint-Nazaire au Mexique, neuf jours; celui de Marseille à Alger, vingt-quatre heures.

Quand s'arrêtera la lutte de vitesse si vivement poursuivie? Nul ne peut le prévoir. Il est cependant impossible de ne pas être frappé des énormes accroissements de dépenses qu'entraîne l'accélération des traversées pour le capital initial, le charbon consommé, le personnel mécanicien, l'équipage, etc. : un voyage à 21 ou 22 nœuds coûte le double du voyage à 17 nœuds.

D'autres progrès mériteraient encore d'être signalés.

La généralisation des water-ballasts économise des manœuvres de lest onéreuses et permet de remédier aux défauts d'arrimage; en outre, la présence d'un double fond constitue un préservatif en cas d'échouage.

Un outillage perfectionné facilite les manœuvres et en réduit la durée.

Des efforts continus ont été faits pour le développement du confort et de la sécurité. Les cabines sont plus larges et plus spacieuses; jadis placés à l'arrière, les salons se trouvent maintenant reportés au milieu du navire, où le tangage fatigue moins; l'éclairage électrique répand partout la lumière à profusion. Grâce à la multiplication et au meilleur agencement des cloisons étanches, le danger des conséquences d'un accident à la coque est très atténué.

L'imagination des inventeurs s'est exercée à rendre les voyages moins pénibles aux passagers par les gros temps. Deux d'entre eux essayèrent un salon suspendu à la Cardan, et, comme la gravité ne suffisait pas pour maintenir ce salon horizontal, ils créèrent un mécanisme hydraulique redresseur; cédant, dit-on, à une distraction, le mécanicien manœuvra un jour le redresseur à contre-sens et, du coup, le système fut condamné. Une tentative plus pratique, qui cependant ne répondit pas à toutes les espérances, consista dans l'association de deux coques formant un ensemble moins sensible au roulis. L'Exposition de 1889 montrait le modèle d'un navire muni d'une caisse

à roulis, contenant de l'eau, qui, lors du renversement des oscillations de la coque, devait continuer son mouvement en vertu de la puissance vive et diminuer l'amplitude des déplacements angulaires. Malgré l'ingéniosité des chercheurs, la solution n'est pas trouvée.

Si les transformations profondes de la navigation à vapeur apparaissent surtout dans le matériel de transport des voyageurs à grande distance, elles n'en ont pas moins d'importance pour le surplus de l'outillage naval, spécialement pour les navires à marchandises.

On peut le constater, par exemple, en suivant l'évolution de la Société française des chargeurs réunis. Cette société possède une flotte puissante, admirablement aménagée, pourvue de chambres frigorifiques, étendant son action jusqu'à 14,000 milles. Ici, il ne s'agit pas de réaliser des vitesses considérables, au prix d'énormes dépenses; les efforts se concentrent sur l'économie de combustible et l'accroissement de la jauge des bâtiments. La Compagnie anglaise péninsulaire, qui joint à ses beaux services de voyageurs des services de cargo-boats, fournit des indications analogues.

Dans le chapitre du matériel des chemins de fer, j'ai déjà dit quelques mots des bacs transbordeurs, établis sur des anses maritimes ou des fleuves et capables de recevoir des trains entiers.

À l'Exposition de 1900 figurait le modèle d'un des bacs brise-glace construits pour le transport à travers le lac Baïkal des trains du transibérien. Bien que se rattachant en principe à la navigation fluviale, ces bacs peuvent être mentionnés à propos de la navigation maritime, car la largeur du lac n'est pas inférieure à 67 kilomètres. Celui dont le modèle était exposé peut porter 25 wagons sur 3 voies; il a une longueur de 88 mètres, un déplacement de 4,200 tonnes en pleine charge, une puissance de 3,750 chevaux, et comporte 3 hélices, dont une à l'avant pour disperser les amas de glace; sa vitesse est de 13 nœuds, quand les eaux sont libres.

Le tableau suivant, emprunté au rapport de M. Estier, fait voir la

progression de la marine à vapeur depuis 1870, dans les pays déjà envisagés pour la navigation à voiles :

PAYS.	1870.		1880.		1890.		1900.	
	NAVIRES.	TONNEAUX.	NAVIRES.	TONNEAUX.	NAVIRES.	TONNEAUX.	NAVIRES.	TONNEAUX.
Angleterre	2,426	1,651,767	3,787	4,265,529	"	8,043,872	5,483	11,093,807
Allemagne.....	127	105,131	277	289,419	"	930,754	900	1,873,388
France	288	219,976	335	423,787	"	805,983	576	985,968
États-Unis.....	597	513,792	548	634,292	"	535,345	551	970,881
Norvège.....	26	7,321	148	67,636	"	245,052	657	672,549
Espagne.....	148	72,845	226	205,448	"	423,627	377	551,887
Italie.....	86	36,358	103	107,070	"	294,705	258	443,365
Suède.....	83	18,633	258	98,969	"	153,374	497	339,879

Au cours des trente dernières années du siècle, le nombre des navires à vapeur, pour les huit pays ci-dessus désignés, s'est accru de 146 p. 100 et leur tonnage de 545 p. 100. Le tonnage moyen des navires varie beaucoup suivant les pays : en tête viennent l'Allemagne et l'Angleterre avec un peu plus de 2,000 tonnes, puis les États-Unis, l'Italie et la France avec 1,700 à 1,800 tonnes, l'Espagne avec 1,460, la Norvège avec 1,020, la Suède avec 680.

3. Faculté totale de transport des principales flottes. — M. Estier a supputé la puissance de transport des principales flottes, en considérant selon l'usage actuel une tonne de bateau à vapeur comme équivalent à 3 tonnes de voilier. Voici les coefficients auxquels il est arrivé et ceux qu'on obtient en prenant pour unité la tonne de bateau à vapeur, c'est-à-dire en réduisant des deux tiers le tonnage des voiliers :

PAYS.	LA TONNE DE VOILIER ÉTANT PRISE POUR UNITÉ.				LA TONNE DE VAPEUR ÉTANT PRISE POUR UNITÉ.			
	1870.	1880.	1890.	1900.	1870.	1880.	1890.	1900.
Angleterre	11,948,454	18,283,253	27,902,364	35,864,783	3,982,818	6,094,418	9,300,788	11,954,928
Allemagne.....	1,361,437	1,822,113	3,458,943	6,141,751	453,812	607,371	1,152,981	2,047,250
États-Unis.....	3,941,983	3,951,851	3,130,480	4,103,816	1,313,994	1,317,284	1,043,493	1,367,939
France	1,551,756	1,813,214	2,727,298	3,250,102	517,252	604,405	909,099	1,083,367
Norvège.....	1,011,845	1,574,629	2,001,353	2,935,288	337,285	524,876	667,188	978,429
Italie.....	1,016,644	1,234,992	1,539,024	1,795,613	338,881	411,664	513,008	598,538
Espagne.....	765,042	941,380	1,524,992	1,795,375	255,014	313,793	508,331	598,458
Suède.....	396,087	696,144	819,410	1,276,910	132,029	232,048	239,803	425,633

Ainsi la proportion dans laquelle a été augmentée la faculté de transport, pendant les trente années de 1870 à 1900, est de 4.5 pour l'Allemagne, 4 pour l'Angleterre, 3.2 pour la Suède, 2.9 pour la Norvège, 2.3 pour l'Espagne, 2.1 pour la France, 1.8 pour l'Italie. Les États-Unis, dont la principale navigation se fait sur les lacs, sont restés presque stationnaires; mais l'essor de leur production, un changement de régime économique et l'ouverture du canal de Panama pourront modifier profondément cette situation.

Des graphiques intéressants, joints au rapport de M. Estier, figurent la relation entre la faculté de transport des divers pays, d'une part, leur commerce extérieur et leur population, d'autre part. Je ne puis m'attarder à ces rapprochements, non plus qu'à d'autres, qui présenteraient également de l'intérêt.

La Grande-Bretagne continue à devancer de très loin toutes les autres nations. Mais l'Allemagne a singulièrement grandi et son merveilleux développement, témoignage d'une activité féconde, doit être attribué, dans une large mesure, à la volonté convaincue de l'Empereur; le progrès de ses constructions navales n'est pas moins étonnant, car, après avoir acheté la plupart de ses navires en Angleterre, encore près des quatre cinquièmes il y a dix ans, elle était parvenue, dès 1898, à pourvoir aux deux tiers des besoins de sa marine; de tels résultats sont d'autant plus beaux que le littoral allemand a peu d'étendue et s'étend pour plus de moitié sur la mer Baltique, isolée du mouvement général. L'abaissement du prix des transports maritimes, leur rapidité croissante, leur sécurité ont nui à la France, en amoindissant son rôle de transitaire; aujourd'hui, les navires vont aborder au plus près du lieu de destination des marchandises, sans que le fret en soit grevé ou en reçoive une surcharge notable; malgré le talent et la science universellement reconnus des ingénieurs français, nos constructions luttent péniblement contre celles de l'Angleterre qui dispose d'un marché immense, s'approvisionne facilement en matériaux, reproduit économiquement les mêmes types à un grand nombre d'exemplaires, possède une abondante population ouvrière exercée et spécialisée. Un pays remarquable par l'exceptionnelle importance relative de sa marine est la Norvège; il n'a qu'une faible

population et un commerce extérieur restreint, mais s'adonne à la navigation maritime comme camionneur pour le compte des autres pays.

4. Matériel de la navigation fluviale. — En donnant un aperçu des travaux de navigation, j'ai déjà été conduit à fournir quelques indications sur le matériel des transports fluviaux, notamment sur les toueurs, les remorqueurs, les appareils de halage mécanique. Il ne me reste qu'à compléter ces indications.

Les bateaux fréquentant les rivières et les canaux n'ont pas subi la même révolution que les navires de mer. Presque tous sont de simples porteurs, généralement halés, plus rarement toués ou remorqués. À quelque catégorie qu'ils appartiennent, quelque nom qu'ils portent, leur fidélité aux vieilles traditions est profonde; les modèles actuels rappellent de bien près leurs ancêtres. Les formes laissent, d'ailleurs, souvent à désirer au point de vue de l'effort nécessaire pour vaincre la résistance de l'eau; j'ai déjà rappelé les belles études de M. Barlatier de Mas à ce sujet. Parmi les modifications de quelque importance survenues au cours du siècle, on peut citer l'allongement de nombreux bateaux à la suite de l'unification des lignes principales du réseau français et l'introduction encore timide du fer ou de l'acier dans la construction des chalands. Le type dominant sur nos voies navigables artificielles à circulation active est celui de la péniche flamande. Très souvent, les bateaux appartiennent aux mariniers, qui les achètent à réméré et se libèrent par annuités; il y a là une classe très intéressante d'artisans, propriétaires de leur instrument de travail, qui leur sert en même temps d'habitation; malheureusement, le métier est dur et les chômages sont nombreux.

Dans beaucoup de cas, en pratique, les toueurs ne sont utilisés qu'à la remonte et descendent à blanc. Les entreprises de touage ont donc reconnu l'utilité d'avoir des bateaux pouvant fonctionner comme toueurs à la montée et comme remorqueurs à la descente : ces bateaux doivent être munis d'un propulseur et se débarrasser facilement de leur chaîne. Des deux conditions qui viennent d'être indiquées, la seconde est malaisée à remplir avec les longs enroulements usuels sur

les treuils moteurs; M. de Bovet a élégamment résolu le problème par son embrayage magnéto-électrique; il obtient l'adhérence nécessaire en aimantant la poulie sur laquelle passe la chaîne ou le câble. Le système de Bovet permet d'effectuer un touage à deux voies sans doubler la chaîne.

Les bateaux à vapeur se sont aventurés sur les fleuves avant de prendre la mer. En 1834, le baron Ch. Dupin, rapporteur du jury de l'Exposition nationale, constatait que, depuis dix à douze ans, ils avaient fait leur apparition sur la Seine, la Loire, le Rhône, la Saône, le Rhin, la Gironde, la Dordogne; la vitesse des meilleurs bateaux (moyenne de la remonte et de la descente) ne dépassait pas 3 lieues à l'heure. Au début, la navigation fluviale à vapeur avait en vue le transport des voyageurs tout autant si ce n'est plus que le transport des marchandises; mais bientôt l'établissement des lignes de chemins de fer modifia la situation et, dès 1844, le baron Dupin écrivait « que le transport des marchandises sauverait seul les entreprises de bateaux à vapeur »; cependant, à cette époque, il avait suffi de cinq années pour élever le nombre des voyageurs à 2,500,000; pendant la même période, le tonnage des marchandises était monté de 275,000 à 1 million de tonneaux. Depuis, la navigation à vapeur sur les fleuves, rivières et canaux a eu des fortunes diverses. Les voyageurs ne lui sont restés en France que dans des cas particuliers, comme celui des transports omnibus à l'intérieur des villes ou sur les lacs. Quant aux marchandises, elles lui ont été vigoureusement disputées par les chemins de fer; d'ailleurs, si les bateaux à vapeur peuvent réussir en rivière, ils s'accommodent moins bien des canaux où leur marche est nécessairement ralentie par le passage aux écluses et par la nécessité de ne pas prendre une vitesse qui provoquerait des remous dangereux pour les autres bateaux ou funestes à la conservation des berges. En 1900, le poids des marchandises transportées par bateaux à vapeur sur nos voies fluviales n'a représenté que 1.9 p. 100 du poids total des embarquements sur le réseau français et 2.2 p. 100 du tonnage kilométrique. Un certain nombre de pays étrangers sont mieux partagés que la France, soit par suite de leurs conditions hydrographiques, soit par suite du moindre développement de leurs voies ferrées.

De types variables, les bateaux à vapeur pratiquant la navigation intérieure sont appropriés, dans chaque cas, aux voies qu'ils fréquentent et au service qu'ils effectuent. En 1900, notre compagnie la plus importante, celle du Havre-Paris-Lyon-Marseille, exposait un matériel très remarquable. Les visiteurs pouvaient également apprécier les efforts louables et féconds de plusieurs entreprises coloniales, telles que la Compagnie des Messageries fluviales de Cochinchine.

5. Matériel de la navigation de plaisance. — Très développée en Angleterre et aux États-Unis, la navigation de plaisance a en France de fervents adeptes, dont le nombre s'est sensiblement accru vers la fin du XIX^e siècle.

Les yachts à voiles employés pour cette navigation sont de tonnage et de gréement variés; cependant deux types prédominent, le cotre ou sloop et la goélette. Généralement, les formes se caractérisent par la finesse des lignes d'eau, l'acculement extrême des couples, l'élancement de l'arrière et la grande inclinaison de la quille, qui souvent affecte une forme convexe très accentuée. La voilure est considérable; on la fait ordinairement en coton fin, quelquefois en soie ou en ramie, pour la rendre plus légère, et on contre-balance l'inclinaison en lestant la quille avec de la fonte ou du plomb.

Très beaux de formes, les yachts à voiles anglais ont aussi de remarquables qualités nautiques. En 1852, le *Teazer*, de 22 tonneaux, fit la traversée de la Tamise aux Indes, aller et retour; l'année suivante, deux cotres allèrent en Australie; etc.

Un prodige de hardiesse a été le voyage des frères Andrews (1878); ces deux Américains traversèrent l'Océan sur le *Nautilus*, bateau à fond plat de 5 m. 70 de long, 0 m. 90 de large et 0 m. 15 de tirant d'eau, portant une seule voile; partis de Boston le 13 juin, ils abordèrent la côte anglaise le 31 juillet. Les Américains se servent fréquemment d'embarcations à fond plat, du type *sharpie*, très stables et susceptibles, en conséquence, de recevoir une voilure fort étendue; certains sharpies ont, dit-on, parcouru 11 milles anglais (de 1,602 mètres) en 34 minutes. On rencontre aussi aux États-Unis des bateaux assez

curieux, sortes de pirogues doubles avec plate-forme intermédiaire et mâture analogue à celle des cotres.

En 1900, a eu lieu à Meulan et au Havre un remarquable concours d'yachting à la voile organisé par l'Administration de l'Exposition. Les modèles les plus divers y étaient représentés, depuis le *coastboat* de 0 t. 30 jusqu'à un majestueux yawl de 153 tonnes.

Si les yachts à voiles caractérisent plus particulièrement le sport nautique maritime, les yachts à vapeur n'en tiennent pas moins très dignement leur place. Beaucoup de ces navires constituent des chefs-d'œuvre de construction et d'aménagement, leurs machines des bijoux, leurs cabines des salons somptueux. Quelques-uns sont de très grands bâtiments. On en cite qui ont fait le tour du monde, comme le *Sunbeam*, ou qui ont effectué maintes fois soit la traversée de l'Atlantique, soit le voyage des Indes.

Outre le concours de bateaux à voiles, l'Administration de l'Exposition de 1900 avait organisé un concours de canots à moteur mécanique. Ces canots, de naissance assez récente, étaient mus à la vapeur, au pétrole, ou exceptionnellement à l'électricité; leur puissance atteignait 24 chevaux.

De la navigation de plaisance à l'aviron, je ne dirai rien. Nous l'avons tous vue sur nos fleuves, sur nos rivières, dans nos stations balnéaires. Quel est même celui d'entre nous qui ne l'a quelque peu pratiquée aux jours de la jeunesse? En Angleterre, en Amérique, elle jouit d'une extrême faveur : au besoin, les *canoes*, qui rappellent les kajaks des Esquimaux, fournissent des instruments de sport capables d'affronter la mer et accessibles aux bourses les moins garnies.

6. Sauvetage des navires et des personnes. — Pour permettre le sauvetage des personnes en cas de sinistre, les navires sont pourvus de bouées et de ceintures en liège, de canots, de radeaux, etc. La mise à la mer des canots et des radeaux doit être facile et rapide.

Des sociétés philanthropiques se sont formées au commencement du siècle, en vue du sauvetage à la côte. Purement locales au début, n'ayant entre elles d'autre solidarité que celle du courage et du dévouement, ces sociétés ne pouvaient donner à leur action l'ampleur dési-

nable. Il importait de réunir et de coordonner leurs efforts. Telle fut l'origine de la Société royale de sauvetage anglaise (1853) et de notre Société centrale de sauvetage des naufragés (1864). Plusieurs autres institutions analogues existent dans divers pays. Le matériel comprend des canots, des engins porte-amarres (canons, fusils, fusées, bâtons plombés) lançant une cordelette qui sert à établir un va-et-vient, des ceintures en liège, etc. La Société centrale française a des stations nombreuses de bateaux réparties sur le littoral et une multitude de postes secondaires; on ne compte plus les actes d'héroïsme de ses sociétaires. Quelques sociétés locales sont restées indépendantes et portent noblement leur drapeau.

L'insubmersibilité des canots de sauvetage est obtenue à l'aide de caissons généralement remplis d'air. Tantôt ils se redressent instantanément, quand la lame les a fait chavirer; tantôt ils sont protégés autant que possible contre le chavirement par leur très grande largeur ou par l'adaptation d'un dériveur mobile. Quelquefois, un pont disposé au-dessus de la flottaison et muni d'ouvertures assure l'écoulement des paquets de mer.

En beaucoup de circonstances, il est possible d'apaiser les vagues aux abords des navires en épandant de l'huile sur la mer.

Le procédé le plus usuel de relèvement des épaves consiste à fermer les voies d'eau au scaphandre, à calfeutrer les ouvertures, à vider le navire par la mise en action de pompes puissantes, puis à le soulever au moyen de chaînes prenant leur appui sur d'autres bateaux ou sur des pontons. Aujourd'hui, les plongeurs descendent en toute sécurité jusqu'à 60 mètres.

En 1900, un concours pour le meilleur appareil de sauvetage dans le cas de sinistre en mer avait été institué à l'Exposition sur l'initiative du Gouvernement des États-Unis et doté d'un prix de 100,000 francs par les héritières de feu Anthony Pollok qui périt, en 1898, avec sa femme dans le naufrage de la *Bourgogne*. 435 concurrents présentèrent leurs inventions. Cependant le jury ne put décerner le prix et alloua seulement une indemnité de 10,000 francs à M. Roper, de Londres, pour divers objets, notamment pour un radeau formant à bord pont-promenade, facile à manœuvrer et susceptible de recevoir des vivres.

Du sauvetage maritime il est naturel de rapprocher le sauvetage à l'intérieur. Beaucoup d'associations s'y consacrent : telle la Société parisienne de sauvetage. Si elles n'ont pas la mer pour champ de bataille, leurs membres n'en sont ni moins dévoués, ni moins vaillants.

Je me reprocherais de ne pas citer en terminant une société qui, à la vérité, ne pratique pas le sauvetage proprement dit, celle des Œuvres de mer à Saint-Pierre et Miquelon. Des navires-hôpitaux, envoyés chaque année par ses soins sur les lieux de pêche, y recueillent les malades.

§ 6. AÉROSTATION.

1. **Ballons libres et ballons captifs.** — L'aérostation est née vers la fin du ^{xviii}e siècle. Trois grands noms français se rattachent à ses origines, ceux de Montgolfier, de Pilâtre de Rozier et de Charles. Joseph-Michel et Étienne Montgolfier imaginèrent les aérostats à air chaud ou montgolfières (1782-1783). Pilâtre de Rozier fit la première ascension libre en montgolfière, avec le marquis d'Arlandes (21 novembre 1783). Le physicien Charles créa de toutes pièces l'art aérostatique; il substitua l'hydrogène à l'air chaud pour le gonflement du ballon, construisit l'enveloppe en soie enduite d'un vernis imperméable, l'enveloppa d'un filet à la base duquel était fixée une nacelle légère, y adapta une soupape à deux clapets permettant de modérer la force ascensionnelle ou d'assurer la descente par l'évacuation du gaz, recourut au lest afin d'arrêter les mouvements de descente ou d'accroître la hauteur d'ascension, eut l'idée de maintenir l'appendice inférieur ouvert de manière à éviter la rupture de l'enveloppe sous l'influence de la dilatation, employa le baromètre à la mesure des altitudes, munit l'aérostat d'une ancre destinée à saisir les obstacles terrestres lors du retour sur le sol, établit un ingénieux appareil propre à la fabrication en grand de l'hydrogène au moyen d'eau, de fer et d'acide sulfurique; son ascension du 1^{er} décembre 1783, en compagnie de Robert, marqua une date mémorable. Quelques années plus tard (22 octobre 1797), Garnerin donna, pour la première fois, à Paris, l'émouvant spectacle d'une descente en parachute de 1,000 mètres de hauteur.

Parmi les ascensions célèbres à divers titres des dernières années du ^{xviii}e siècle, il y a lieu de rappeler celle de Blanchard et du docteur américain Jeffries, qui franchirent la Manche de Douvres à Calais et vinrent atterrir dans la forêt de Guines (7 janvier 1785), puis celle de Pilâtre de Rozier et de Romain, qui périrent en voulant effectuer la traversée inverse au départ de Boulogne (15 juin 1785).

Sous la première République, les ballons captifs rendirent d'appréciables services à nos armées; je me réserve d'y revenir à propos de l'aérostation militaire.

Au début du XIX^e siècle, furent inaugurées les ascensions scientifiques. Le 24 juin 1802, Humboldt et Bompland s'élevèrent à 5,878 mètres et firent de nombreuses observations sur la pression barométrique ainsi que sur la température. Robertson et Lhoest atteignirent, le 18 juillet 1803, une hauteur de 7,400 mètres et se sentirent fortement éprouvés par la raréfaction de l'air; ils crurent remarquer que l'action magnétique du globe sur l'aiguille aimantée décroissait proportionnellement à l'altitude au-dessus du niveau de la mer. Peu après, une nouvelle ascension opérée en Russie par Robertson, avec Saccharoff, conduisit au même résultat apparent. Comme cette décroissance du magnétisme était énergiquement combattue par Laplace, Biot et Gay-Lussac effectuèrent, à leur tour, une ascension scientifique, le 20 août 1804, et démontrèrent que Robertson s'était trompé; l'erreur provenait des difficultés d'observation de l'aiguille aimantée au milieu des oscillations et des rotations continuelles de l'aérostat; ils avaient atteint 3,977 mètres, constaté à l'aide de l'hygromètre une diminution progressive dans l'humidité de l'air, recueilli d'intéressantes données sur l'état électrique et la température de l'atmosphère. Gay-Lussac seul monta, le 16 septembre 1804, à 7,016 mètres d'altitude, vérifia l'exactitude des observations précédentes, rapporta deux échantillons d'air prélevés à 6,561 mètres et à 6,636 mètres; l'analyse de ces échantillons au laboratoire de l'École polytechnique accusa les mêmes proportions d'oxygène et d'azote qu'à la surface du sol. Malgré ces belles contributions à la science, l'aérostation scientifique subit ensuite un long temps d'arrêt et les ballons furent réduits au rôle d'auxiliaires des fêtes publiques.

Un incident assez curieux se rattachant à l'emploi des aérostats dans les fêtes mérite d'être mentionné. Le jour du sacre de Napoléon I^{er}, Garnerin lança du parvis Notre-Dame, à l'issue du feu d'artifice, un immense ballon pavoisé, qui portait un aigle et une couronne impériale illuminée par trois mille verres de couleur. Ce ballon alla s'abattre le lendemain matin près de Rome, après avoir heurté le tombeau de Néron sur lequel se brisa la couronne. Il fut conservé au Vatican où on put le voir, jusqu'en 1814, suspendu à une voûte.

Les fêtes avaient quelquefois une fin tragique. C'est ainsi que

M^{me} Blanchard fut tuée le 6 juillet 1819 : elle avait enflammé l'hydrogène de son aérostat en tirant de la nacelle un feu d'artifice.

Au cours de l'année 1836, l'aéronaute anglais Green réalisa la première traversée de grande longueur ; il parcourut en 18 heures, avec deux compagnons, la distance de 800 kilomètres comprise entre Londres et le duché de Nassau. Green fut l'initiateur du gonflement des ballons par le gaz d'éclairage et inventa le guide-rope, dont la fonction principale est celle d'un équilibreur automatique en cours de route dans les voyages à faible hauteur et qui sert, en outre, à délester progressivement l'aérostat au moment de l'atterrissage, à ralentir la dernière partie de la descente, à amortir le choc contre terre et, en cas de traînage, à agir comme un frein vigoureux par son frottement sur le sol. On attribue aussi à Green l'une des plus grandes vitesses obtenues en ballon : 63 mètres par seconde, dans un parcours de 58 kilomètres.

En 1850 eurent lieu deux ascensions scientifiques de Barral et Bixio, qui atteignirent, dans la première, 5,893 mètres, dans la seconde, 7,039 mètres, et se livrèrent principalement à des observations de températures, observations reprises en 1852 par l'anglais Welsh.

Les années 1861, 1862 et 1863 sont marquées par une série d'ascensions scientifiques que M. Glaisher, directeur du Bureau météorologique de Greenwich, exécuta avec le pilote Coxwell. Ce savant dépassa l'altitude de 8,838 mètres (5 septembre 1862) ; ayant alors perdu connaissance, il ne put que supputer approximativement la hauteur à laquelle il était définitivement parvenu et l'évalua au chiffre, d'ailleurs invraisemblable, de 11,000 mètres. Ses expériences eurent principalement trait à la décroissance de la température et de l'état hygrométrique, aux variations du potentiel électrique, à la propagation verticale du son ; en outre, il se livra à des observations physiologiques et à l'étude du spectre solaire.

Dès 1859, Nadar s'était initié à l'aérostation sous la conduite d'Eugène et de Jules Godard, et avait tenté l'application de la photographie en ballon aux levés topographiques, mais sans arriver à des résultats bien encourageants, car la photographie instantanée au géla-

tino-bromure d'argent n'existait pas encore. En 1863, il fit construire le *Géant*, aérostat de 6,000 mètres cubes, et s'en servit pour diverses ascensions, dont l'une, à laquelle participaient sa jeune femme et sept autres personnes, aboutit à une descente vertigineuse dans les plaines du Hanovre et à un horrible trainage, semant les passagers l'un après l'autre. Les dimensions du *Géant* furent singulièrement dépassées, l'année suivante, par la montgolfière l'*Aigle*, d'Eugène Godard, cubant 14,000 mètres et chauffée au moyen d'un calorifère à triple enveloppe.

À l'occasion de l'Exposition universelle de 1867, Henri Giffard établit un premier aérostat captif à vapeur, retenu par un câble de 330 mètres, mesurant 5,000 mètres cubes et pouvant enlever une vingtaine de personnes. En même temps, M. Camille Flammarion ouvrait la série de ses ascensions scientifiques (état hygrométrique de l'air; accroissement du pouvoir diathermane et de la radiation solaire; circulation des courants et mouvements généraux de l'atmosphère; variations de la température; formes, hauteur et dimensions des nuages; lois générales de l'acoustique et de l'optique; astronomie; etc.); le 14 juillet 1867, il alla de Paris à Solingen, ne mettant pas plus de douze heures et demie pour franchir à vol d'oiseau 550 kilomètres. Ses émules, MM. Wilfrid de Fonvielle et Gaston Tissandier, dont la collaboration devait être si intime, débutèrent l'un en 1867, l'autre en 1868; bientôt s'adjoignit à eux M. Albert Tissandier, architecte et dessinateur de talent, qui produisit un grand nombre de dessins et d'aquarelles d'un haut intérêt. Le 16 août 1868, Gaston Tissandier et Duruof, montés sur le *Neptune*, purent, en profitant de vents opposés à diverses altitudes, partir de Calais, se laisser entraîner à 25 ou 30 kilomètres au-dessus de la mer du Nord et revenir au cap Gris-Nez; six mois plus tard, Gaston Tissandier et M. W. de Fonvielle, emportés par l'*Hirondelle*, parcoururent 80 kilomètres en 35 minutes et subirent un trainage dramatique.

Tous ceux qui vivaient en 1870 savent le rôle admirable des aérostiers, lors de l'investissement de Paris. Nadar, Eugène Godard, Gabriel Mangin, Duruof, Yon, Camille Dartois, aidés par le savant Hervé Mangon, firent preuve d'un dévouement infatigable, tandis qu'en

province les frères Tissandier prêtaient leur concours patriotique à la défense nationale.

Le but était surtout d'envoyer dans les départements des dépêches de Paris. Presque sans ressources, la capitale dut improviser un matériel et le confier à de courageux citoyens, qui jamais encore n'avaient mis le pied sur un ballon. Soixante-six aérostats montés furent construits, gonflés au gaz d'éclairage et lancés dans les airs. Duruof partit le premier, trois jours après l'ouverture du siège. Certes, le voyage n'était pas une excursion d'agrément. Les aéronautes avaient à subir le feu des Prussiens : Krupp fit même, pour la circonstance, des mousquets à ballon, sortes de fusils de rempart sur roues, pivotant autour d'un affût à chandelier. On risquait ensuite de descendre en pays occupé, et l'Allemagne refusait aux aéronautes la qualité de belligérants. Parfois, le voyage se prolongeait plus que de raison : tel fut le cas du ballon *La Ville d'Orléans*, qui, parti à 11 heures 45 du soir, déposait le lendemain après-midi MM. Paul Rolier et Béziers à 1,250 kilomètres, en pleine Norvège; comme première rencontre, les deux naufragés eurent celle de trois loups qui, tout ébahis, les regardèrent respectueusement passer; cette entrevue désagréable eut pour compensation l'accueil chaleureux des Norvégiens. Deux ballons, lancés également la nuit, se perdirent en mer : le *Jacquard*, monté par le marin Prince, sur les côtes d'Angleterre; le *Richard Wallace*, monté par le soldat Lacaze, au large de La Rochelle. Je ne parle pas des jambes et des bras fracturés.

Une ascension mémorable, historique, autant que périlleuse et mouvementée, fut celle de l'*Armand Barbès* (7 octobre) : Gambetta et Spuller partageaient pour organiser la défense nationale, pour ranimer dans tous les cœurs la foi et l'espérance, pour libérer la France ou du moins pour sauver son honneur; les salves de mousqueterie, les incidents ne leur furent pas épargnés; néanmoins ils purent atterrir sains et saufs à Montdidier.

Les visiteurs de l'Exposition universelle de 1900 y voyaient le *Volta*, dans lequel un illustre savant, M. Janssen, quitta Paris le 2 décembre 1870, afin de se rendre ensuite en Algérie et d'y observer une éclipse totale de soleil.

Gaston Tissandier et son frère préparaient un service de retour sur Paris, à la faveur de vents propices, quand la marche en avant de l'ennemi, puis un insuccès, arrêterent leurs tentatives.

À peine la guerre était-elle terminée que les ascensions scientifiques furent reprises par M. Camille Flammarion, Tissandier et M. W. de Fonvielle. Le 8 juin 1872, à bord de la *Léa*, G. Tissandier et le vice-amiral Roussin firent une belle observation de l'auréole des aéronautes, phénomène d'optique analogue à celui du spectre d'Ulloa. Conformément à un programme de recherches élaboré par la Société française de navigation aérienne, l'atmosphère devait être étudiée au moyen d'ascensions à longue durée et à grande hauteur. Sivel et Crocé-Spinelli s'élevèrent, le 22 mars 1874, à 7,300 mètres; ils avaient emporté des sacs d'oxygène, dont l'inspiration les protégea contre les effets de la dépression. Ensuite vint une traversée de vingt-deux heures et quarante minutes, par les frères Tissandier, Sivel, Jobert et Crocé-Spinelli. À cette traversée succéda, le 15 avril 1875, une nouvelle ascension vers les grandes hauteurs, celle du *Zénith*, avec Crocé-Spinelli, G. Tissandier et Sivel; le ballon gagna l'altitude de 8,600 mètres; mais, en dépit de l'oxygène, Crocé-Spinelli et Sivel y perdirent la vie.

Henri Giffard, qui avait déjà construit un ballon captif à vapeur pour l'Exposition universelle de 1867, en établit un second d'une admirable perfection pour l'Exposition de 1878. Cet aérostat cubait 25,000 mètres, était retenu par un câble de 600 mètres et comportait deux machines de 300 chevaux; en 72 jours d'ascension, il enleva plus de 35,000 personnes à 500 mètres.

Les ascensions scientifiques continuaient. Ne pouvant les énumérer toutes, j'en citerai seulement deux à titre d'exemples : MM. Jovis et Mallet, à bord du *Horla*, atteignirent 7,100 mètres et franchirent 400 kilomètres en quatre heures (13 août 1887); un Allemand, M. le docteur Berson, monta à 9,150 mètres (4 décembre 1894).

Désireux d'explorer des régions encore plus hautes, les savants y envoyèrent des ballons-sondes pourvus d'appareils enregistreurs. L'idée était ancienne, car Le Monnier l'indiqua en 1783 à l'Académie des sciences; MM. Besançon et Hermite eurent le mérite de la réaliser

en 1892. En 1897, un ballon-sonde s'éleva à 15,500 mètres, dans des couches où la température n'était que de - 66 degrés; M. Müntz analysa de l'air puisé automatiquement à ce niveau par un appareil dû à M. Cailletet. Trois ans auparavant, le *Cirrus*, parti d'Allemagne, avait atteint 18,450 mètres et accompli des parcours de 900 à 1,000 kilomètres. M. Teisserenc de Bort, directeur de l'observatoire de Trappes, emploie d'une manière méthodique les ballons-sondes et les cerfs-volants; il a dépassé 15,000 mètres avec les ballons et 5,000 mètres avec les cerfs-volants.

La météorologie et la physique du globe ne sont pas les seules sciences tirant parti de l'aérostation. Souvent, l'astronomie en use pour des observations que les brouillards, les pluies ou d'autres obstacles rendent impossibles à terre; les ascensions astronomiques les plus intéressantes sont celles que provoqua, en 1898, la chasse aux Léonides. Au commencement du xx^e siècle, la physiologie devait également appliquer l'aérostation à de très belles expériences, notamment sur l'augmentation des globules rouges dans le sang.

Rappelons encore la photographie aérostatique en ballon libre, qui date réellement de 1880. Aucune ascension scientifique ou sportive ne se fait aujourd'hui sans un appareil de photographie.

De tout temps, la mer a fasciné les aéronautes. Blanchard traversa la Manche. Il eut beaucoup d'imitateurs, trop souvent victimes de leur ardeur, quand un navire sauveur ne venait pas les recueillir. Sivel avait inventé, pour ce genre de traversées, le cône-ancre, qui permet aux aérostats de se tenir à l'ancre sur les flots; dès 1874, J. Duruof, parti de Cherbourg, dut son salut à l'appareil ainsi créé par Sivel. Plus tard, Lhoste imagina un ensemble d'agrès, hélice horizontale sous la nacelle ceinte de liège, voile triangulaire se détachant de l'équateur du ballon et fixé d'autre part au cercle ainsi qu'à une vergue de 4 m. 50, flotteur-frein cylindro-conique, cône-ancre, seaux destinés à puiser de l'eau comme lest; grâce au flotteur et à la voile, il obtint une déviation sensible; une ascension effectuée en 1887 au-dessus de la Manche entraîna cependant sa mort et celle de son ami Mangot. Le matériel spécial Hervé est considéré comme le plus parfait; il se compose de stabilisateurs (gros câbles ou séries de carènes articulées à

section rectangulaire), qui ont pour but de réaliser la stabilité verticale de l'aérostat, et de déviateurs (séries de lames parallèles), sur lesquels l'eau exerce une pression oblique par rapport à la direction du ballon; ce matériel a fait ses preuves dans les magnifiques voyages du comte Henry de la Vaulx sur le *Méditerranéen* (1901), voyages dont l'un s'est aisément prolongé pendant quarante-deux heures.

Il est impossible de ne pas donner ici un souvenir à l'expédition d'Andrée vers le pôle Nord (1897). Nul ne sait ce que sont devenus Andrée et ses deux compagnons, Fraenkel et Strendberg.

Les concours de ballons institués à l'Exposition universelle de 1900 ont produit à juste titre la plus vive impression. Ils étaient organisés dans l'annexe du bois de Vincennes et embrassaient tous les genres d'exercices aéronautiques; les concurrents furent assez nombreux pour fournir à l'une des épreuves le spectacle, jusqu'alors inconnu, de 22 ballons s'élevant ensemble dans les airs. Dans les concours de plus longue distance ou de durée, deux concurrents, M. H. de la Vaulx et M. Balsan, traversèrent l'Europe et atterrirent sur le sol russe, après avoir parcouru le premier 1,925 kilomètres en 35 heures 45 minutes et le second 1,345 kilomètres en 27 heures. Dans les épreuves d'altitude, trois concurrents émérites, bravant le péril extrême de ces ascensions et n'arrivant à respirer qu'au moyen de provisions d'oxygène, s'élevèrent le premier (M. Balsan) à 8,417 mètres, le second (M. Juchmès) à 6,867 mètres, le troisième (M. de la Vaulx) à 6,820 mètres. Enfin, dans les épreuves d'atterrissage au plus près d'un point déterminé à l'avance, six concurrents descendirent dans une zone de 400 à 1,200 mètres de ce point. Le grand prix de l'aéronautique échut à M. de la Vaulx. Jamais les progrès de l'aérostation ne s'étaient mieux affirmés; notre savante école militaire d'aérostation, l'importante société d'amateurs l'*Aéro-Club* et des ingénieurs éminents avaient associé leurs efforts pour l'organisation des épreuves, qu'il eût été difficile de rêver plus complètes et plus brillantes.

2. Direction des ballons. — À peine l'aérostation était-elle née que les Montgolfier songèrent à résoudre le problème de la direction.

Bientôt, Étienne fut convaincu des difficultés de ce problème; il se livra néanmoins à de longues et infructueuses recherches. Les premiers, ses deux frères, proposèrent la forme poisson.

D'autres essais, spécialement ceux de Guyton de Morveau, suivirent sans plus de succès.

Meusnier, qui pensait à un voyage autour de la terre avec un équipage de trente hommes, trouva, dès 1784, trois principes essentiels de la dirigeabilité : forme oblongue du ballon, afin de diminuer la résistance de l'air; invariabilité de la forme par l'adaptation d'un ballonnet intérieur gonflé d'air; emploi d'un propulseur hélicoïdal. À défaut d'autre vice, son projet était trop coûteux et ne put être mis à exécution; il n'inspira qu'une expérience maladroite tentée par le duc de Chartres et les frères Robert.

Ensuite surgirent des propositions innombrables, monuments d'expérience et d'incapacité. À peine peut-on signaler, en raison de son intérêt historique, un projet d'aérostat à hélice avec ballonnet intérieur, dressé vers 1825 par le futur empereur Napoléon III, et, en raison de son mérite, l'invention par Jullien d'un petit dirigeable plus effilé à l'arrière qu'à l'avant, auquel un ressort d'horlogerie fournissait la force motrice.

Dans la pensée de Meusnier, le propulseur avait exclusivement pour but de permettre la recherche des courants favorables. Henri Giffard voulut aller plus loin dans la voie de la direction des aérostats et construisit en 1852 et 1855 deux ballons allongés à hélice, l'un de 2,500 mètres cubes, l'autre de 3,200 mètres cubes, mus par une machine à vapeur. Il obtint une vitesse propre de 2 à 3 mètres. Son ascension de 1855 faillit se terminer de la façon la plus malheureuse; l'aérostat, d'une longueur excessive relativement au diamètre, éprouvait des mouvements de tangage très accusés, ne pouvait plus reprendre sa position normale et tendait même à se dresser verticalement, ce qui faisait écouler le gaz par l'orifice inférieur; à l'atterrissage, l'enveloppe sortit du filet et se coupa en deux morceaux. Les ballons de Giffard n'avaient pas de ballonnet intérieur.

En 1870, vint Dupuy de Lôme. Il adopta la forme allongée, avec une proportion raisonnable entre la longueur et la hauteur. Réinven-

tant le ballonnet, il le constitua par une simple cloison d'étoffe partageant la cavité en deux compartiments, le premier pour le gaz hydrogène, le second pour l'air insufflé à l'aide d'un ventilateur. Son mode de suspension de la nacelle par des liens traçant des pyramides indéformables contribuait puissamment à la solidité du système. Le gouvernail consistait en une toile triangulaire et l'appareil moteur en une hélice mue par un treuil à bras. En 1872 eut lieu une ascension à laquelle prirent part Dupuy de Lôme, M. Zédé, G. Yon et onze hommes de manœuvre; le ballon, d'un volume de 3,454 mètres cubes, monta à 1,020 mètres et réalisa une vitesse propre de 2 m. 85; incapable de lutter contre le vent, qui soufflait avec une vitesse de 15 mètres, il pouvait du moins dévier de 10 à 12 degrés sa direction.

Gaston Tissandier reprit l'étude de la question en 1881. Son idée maîtresse était de recourir à un moteur électrique : les moteurs de ce genre ont l'avantage de fonctionner sans foyer, de conserver un poids uniforme et d'être d'une extrême docilité. Après des recherches fort remarquables, notamment sur les piles puissantes et légères, G. Tissandier construisit, en collaboration avec son frère, un ballon allongé de 1,060 mètres cubes, muni d'un gouvernail en percaline, d'une hélice et d'une dynamo Siemens donnant 1 cheval et demi sous un poids de 45 kilogrammes. Deux ascensions eurent lieu, le 8 octobre 1883 et le 26 septembre 1884; les vitesses propres atteignirent 3 et 4 mètres par seconde. La première ascension avait révélé des mouvements giratoires, qui furent corrigés par un développement de la surface du gouvernail.

Entre temps, les capitaines Ch. Renard et Krebs avaient pour suivi la préparation de l'aéronat la *France*. Ce ballon dirigeable, de 1,864 mètres cubes, présentait une longueur de 50 m. 40 entre les pointes et un diamètre de 8 m. 40; son maître couple se trouvait au quart de la longueur, à partir de l'avant; le moteur électrique, pesant 100 kilogrammes, fournissait une force portée, après diverses modifications, à 9 chevaux et transmettait le mouvement, par l'intermédiaire d'engrenages ingénieux, à une vaste hélice de 7 mètres de diamètre, placée en avant de la nacelle; la pile ne pesait pas plus de 400 kilogrammes et pouvait alimenter la dynamo pendant une heure

quarante. Sur sept voyages effectués du 9 août 1884 au 23 septembre 1885, la *France* en a accompli cinq sous la forme d'une courbe fermée, revenant ainsi à son point de départ et atteignant des vitesses de 6 m. 40.

M. Santos-Dumont aborda la construction des dirigeables en 1898. Ses ballons, au début du moins, étaient inférieurs à ceux de Dupuy de Lôme, des frères Tissandier et des officiers de Meudon, dans beaucoup de détails importants; mais l'emploi du moteur à pétrole extraléger, dont le docteur allemand Woelfert avait fait une première application aux aérostats, constituait un élément précieux de supériorité. Une indomptable énergie finit par apporter à M. Santos-Dumont des succès retentissants; il gagna, le 19 octobre 1901, un prix de 100,000 francs que M. Deutsch avait généreusement institué.

Sans empiéter sur le xx^e siècle par des indications détaillées, je crois devoir rappeler la chute mortelle de M. Severo le 12 mai 1902 (inflammation, au contact du moteur, de l'hydrogène fusant par la soupape inférieure), celle de MM. de Bradsky et Morin le 13 octobre 1902 (rupture des fils d'acier supportant la nacelle), les belles expériences de MM. Lebaudy avec un ballon construit par MM. Julliot et Surcouf. D'autres dirigeables se préparent. Il semble que les vitesses de 10, 12 et même 14 mètres soient maintenant pratiques.

3. Aérostation militaire. — L'aérostation était encore bien jeune lorsque, sur l'initiative de Guyton de Morveau, une Commission de savants présidée par l'illustre Monge proposa au Comité de salut public de l'enrôler dans les armées de la République. Mais, à cette époque, la patrie était en danger, l'Europe coalisée la menaçait de toutes parts, et les enfants eux-mêmes prenaient du service pour la défendre. Les hommes de la Révolution avaient d'ailleurs l'esprit ouvert aux idées neuves. Aussi la proposition fut-elle accueillie sur l'heure.

Une difficulté devait avant tout être résolue. Charles avait préparé son gaz hydrogène par le procédé des tonneaux, en faisant agir de l'eau chargée d'acide sulfurique sur de la limaille de fer. Il fallait trouver une autre méthode, parce que l'acide sulfurique ne se produisait qu'à

l'aide du soufre et que le soufre était réservé à la fabrication de la poudre. Guyton de Morveau et Coutelle réalisèrent en grand l'expérience de Lavoisier sur la décomposition de la vapeur d'eau par le fer chauffé au rouge.

Bientôt un décret du 2 avril 1794 créait une compagnie d'aéro-stiers, avec Coutelle comme capitaine. Tandis que Coutelle menait ses soldats et ses ballons au feu, Conté, installé au Petit-Meudon, dans les dépendances du château, appliquait les ressources de son esprit universel à améliorer le matériel de l'aérostation; pour l'enveloppe, son choix se portait sur le taffetas écru qu'il découpait en fuseaux destinés à être ensuite collés et cousus; il rendait cette enveloppe imperméable par un vernissage extérieur et intérieur; ses nacelles étaient en osier, avec revêtement en cuir, et présentaient au centre un orifice permettant à la fois de voir le sol sans se pencher et de descendre des bulletins d'observation. On fabriquait aussi à Meudon de petits ballons en baudruche qui servaient de pilotes et qu'on lâchait avant les ascensions, pour déterminer la direction et la vitesse du vent. Conté mit à son œuvre un dévouement infatigable et perdit même un œil en procédant à des recherches sur les actions réciproques des gaz et des vernis.

C'est de Meudon que sortirent tous les ballons captifs qui s'illustrèrent aux armées de la République. L'un des plus justement célèbres fut l'*Entreprenant*. Coutelle le conduisit à Maubeuge, à Charleroi, à Fleurus, se livrant à de véritables actes d'héroïsme, bravant les projectiles ennemis, rendant à nos généraux et en particulier à Jourdan des services signalés, les éclairant sans cesse au sujet des positions et des mouvements de l'adversaire.

Dès le 23 juin 1794, le Comité de salut public constituait une seconde compagnie d'aérosters; quelques mois plus tard, le 31 octobre, il fondait définitivement l'École nationale aérostatique de Meudon, sous la direction de Conté.

Quand s'organisa l'expédition d'Égypte, Conté emmena Coutelle avec l'élite de l'École de Meudon et son meilleur matériel aérostatique. Tout ce matériel périt à Aboukir (1^{er} et 2 août 1798). Ce fut la fin d'une brillante, mais trop courte carrière. Le corps des aérosters fut dissous par un arrêté du Directoire exécutif, du 28 janvier 1799, qui

confiait pour la forme au génie militaire le soin de conserver les traditions de l'École de Meudon. Cependant, en 1815, Carnot, défendant Anvers, employa de nouveau les ballons à la reconnaissance des positions ennemies.

On ne peut guère considérer comme sérieuse la tentative faite en 1849, devant Venise, par les Autrichiens, pour bombarder la ville au moyen de projectiles incendiaires placés dans de petits ballons : l'entreprise échoua piteusement et faillit même tourner contre ses auteurs, à la suite d'une saute de vent.

Pendant la guerre de Sécession (1861-1862), les Américains furent mieux inspirés. Ils surent tirer parti des ascensions captives et même des ascensions libres. L'aréonaute Allan, de Rhode-Island, imagina de mettre la nacelle d'un ballon captif en relation avec la terre par un fil télégraphique. Des vues photographiques furent en outre prises à Richmond.

Les événements de 1870-1871 n'apportèrent à l'aérostation militaire proprement dite qu'un rôle modeste. À Metz, les officiers chargés de la direction du service recoururent aux ballons perdus. À Paris, l'organisation des ballons-poste transforma les aérostats captifs en messagers. À Orléans, au Mans et à Laval, les ascensions captives furent assez nombreuses ; mais, par suite des circonstances, elles ne donnèrent que de minces résultats, malgré le courage des aérostiers et la bonne volonté des généraux.

En 1874, le Ministre de la guerre créa une Commission des communications aériennes, présidée par le colonel Laussedat, et désigna pour les fonctions de secrétaire le capitaine du génie Charles Renard. Cette Commission entreprit d'abord des expériences. Pour l'une de ses ascensions libres, l'*Univers* embarqua le colonel Laussedat, le commandant Mangin, les capitaines Renard et Bitard, le lieutenant Bastoul, M. Albert Tissandier, M. Eugène Godard, propriétaire et pilote du ballon. Un accident se produisit à la soupape ; MM. Laussedat, Mangin, Renard et Godard furent blessés. Désirant ne plus courir semblable aventure, la Commission voulut construire elle-même ses ballons. À cette occasion, le capitaine Renard imagina une excellente soupape et créa un appareil à hydrogène fondé sur le principe de la

circulation continue. Le parc de Chalais fut mis, en 1877, à la disposition du service d'aérostation. Aidé par le lieutenant Krebs et par un aéronaute civil, M. Duté-Poitevin, le capitaine Renard, directeur de l'établissement, sut organiser en quelques mois un atelier modeste, mais fort présentable. À force d'énergique ténacité, il obtint des crédits à peu près suffisants et poursuivit en même temps la construction de ballons captifs et d'un ballon dirigeable.

Aujourd'hui, les parcs aérostatiques de campagne comprennent : deux ballons captifs normaux, pouvant enlever deux aéronautes et manœuvrés au treuil à vapeur; un ballon auxiliaire, recevant un aéronaute et manœuvré à bras; un ballon-gazomètre, ayant pour objet de réparer les pertes des ballons proprement dits, mais supprimé lorsque le parc a des tubes remplis d'hydrogène sous pression; une voiture-treuil; une voiture-fourgon; une voiture d'agrès; un générateur à hydrogène ou des voitures de tubes à hydrogène comprimé. Les parcs de forteresse sont, en outre, pourvus d'un matériel pour les ascensions libres.

Des ballons militaires, et spécialement des ballons captifs, j'ai peu de chose à dire, si ce n'est qu'ils sont merveilleusement étudiés. Leur soupape se prête à une ouverture graduée ou à un déclenchement complet, et sert au cas d'une ascension libre volontaire ou involontaire; la suspension de la nacelle et l'attache du câble de retenue offrent d'excellentes dispositions; l'ancre est une sorte de herse à crochets. On doit aussi au colonel Renard l'application industrielle de l'électrolyse de l'eau pour la fabrication de l'hydrogène. Notre matériel aérostatique a été éprouvé non seulement aux grandes manœuvres, mais dans les campagnes coloniales, par exemple au Tonkin.

Rappelons que les ballons libres ou captifs permettent de prendre des vues photographiques remarquables; que les ballons captifs peuvent, sans être montés, servir à la transmission de signaux électriques à grande distance; que le téléphone rend leurs communications avec le sol faciles et sûres; enfin qu'ils sont susceptibles d'utilisation par la marine comme par l'armée de terre. À ce dernier point de vue, des expériences concluantes ont été faites; la Marine possède maintenant un service d'aérostation captive parfaitement organisé.

Presque toutes les puissances étrangères ont suivi l'exemple du Gouvernement français et reconnu l'utilité de l'aérostation militaire. Mais, tandis que notre Ministère de la guerre construit lui-même son matériel, les ministères des autres pays, sauf l'Allemagne, l'Angleterre et la Russie, s'adressent à l'industrie privée et, dans une large mesure, à des constructeurs de France. L'Angleterre a associé le cerf-volant au ballon captif, pour permettre à celui-ci de se maintenir en l'air malgré la violence du vent. De son côté, l'Allemagne emploie le *drachen-ballon*, appareil d'un caractère mixte, qui participe à la fois du ballon et du cerf-volant; cet appareil est lourd et compliqué, mais résiste bien aux vents rapides.

4. Aviation. — Depuis les temps les plus reculés, l'aviation, c'est-à-dire la navigation aérienne par des appareils plus lourds que l'air, est un objet de recherches persévérantes. Elle a donné lieu, pendant le XIX^e siècle, à d'innombrables tentatives, sans qu'une solution vraiment satisfaisante ait encore été découverte. Une étude historique des appareils de vol mécanique, des hélicoptères et des aéroplanes successivement imaginés, de 1800 à 1900, ne saurait trouver place ici. Quelques repères suffiront, d'ailleurs, à jalonner le chemin parcouru.

Le premier nom digne d'être cité dans cette courte revue est celui de Ponton d'Amécourt, auteur d'un hélicoptère qui comprenait : deux hélices horizontales superposées, ayant même axe vertical et tournant en sens contraire; une autre hélice placée à l'arrière et servant de propulseur; un gouvernail de direction; un petit moteur à vapeur, merveilleux de travail et de précision. Bien que l'appareil mis en action ne se soit pas complètement soulevé, de la Landelle, puis Nadar, pris d'enthousiasme, engagèrent une vigoureuse campagne de propagande pour le plus lourd que l'air; Babinet prêta à leur apostolat l'appui de sa haute autorité scientifique (1860-1863).

Titulaire d'un des grands prix de mathématiques de l'Académie des sciences, pour sa Théorie du vol des oiseaux faite en collaboration avec Crocé-Spinelli, le docteur Hureau de Villeneuve fut aussi un apôtre. Partisan de l'imitation du vol des oiseaux, il n'excluait cependant pas les autres systèmes. Son éclectisme le conduisit à soutenir chaleureu-

sement Alphonse Pénaud, qui, du reste, se joignit à lui pour proposer l'étude du vol par la photographie instantanée. Il établit un oiseau mécanique s'élevant à 1 mètre et redescendant en parachute; des perfectionnements successifs l'amènèrent à une chauve-souris, que les membres du Congrès des sociétés savantes virent, en 1887, traverser la grande salle de la Sorbonne et venir se poser sur le bureau du président, Milne-Edwards.

A. Pénaud avait eu l'idée d'actionner de petits hélicoptères par la force emmagasinée dans un caoutchouc tordu (1870). Il appliqua la même source d'énergie à son planophore, aéroplane à simple hélice et à gouvernail, admirablement équilibré et capable de parcourir 40 mètres (1871). Un oiseau dû à son génie inventif se transportait horizontalement ou suivant une légère inclinaison à 12 ou 15 mètres de distance (1873).

D'autres oiseaux artificiels, dont l'un construit par M. Tatin (1874), rivalisèrent avec les précédents.

Un ingénieur italien, M. Forlanini, fit en 1877 le premier hélicoptère à vapeur, qui ait quitté le sol et volé, emportant son moteur et son générateur. L'appareil n'avait qu'une hélice en mouvement; son générateur était sans foyer; il monta à 13 mètres et se maintint vingt secondes en l'air.

Ensuite vinrent les beaux travaux d'Otto Lilienthal. Cet ingénieur allemand se consacra dès sa jeunesse à l'étude du vol des oiseaux et à la construction d'aéroplanes; partant de points élevés et allant contre le vent, il parcourait des distances de 200 à 300 mètres. Ses derniers appareils présentaient deux surfaces superposées. Il périt en 1896, au cours d'expériences sur un aéroplane défectueux au point de vue de l'équilibre longitudinal.

À l'Exposition de 1900 figurait l'aéroplane ou avion d'Ader, machine volante capable d'enlever un homme et ressemblant à une gigantesque chauve-souris. M. Ader commença ses recherches en 1882, obtint un important concours financier du Gouvernement et essaya son appareil en 1897 sur une piste circulaire de 450 mètres de diamètre. Deux hélices tournaient en sens contraire et, disposées à l'avant, servaient de propulseurs; elles étaient actionnées par une machine à vapeur

très légère. Après avoir parcouru la piste à une allure de plus en plus rapide, l'aéroplane quitta le sol; l'inventeur voulut s'orienter contre le vent, mais une rafale le décida à regagner le sol. Les roues ayant mal pris contact, un renversement se produisit et détermina des avaries.

Parmi les nombreux aéroplanes qui suivirent, il est juste de mentionner celui de M. Samuel-Pierpont Langley, savant professeur de Washington. Le dernier modèle avait deux paires d'ailes inclinées à 135 degrés l'une par rapport à l'autre, deux hélices tournant à 1,000 tours par minute, un gouvernail à action verticale et horizontale, un moteur à vapeur; il pesait 13 kilogr. 600. Son parcours fut de 1,600 mètres en une minute et quarante-cinq secondes. M. Langley s'était inspiré des recherches d'A. Pénaud, à qui il eut soin de rendre hommage (1896).

Vers la même époque, MM. Tatin et Richet expérimentèrent en France un aéroplane à vapeur, qui n'offrait pas la stabilité de celui du professeur Langley et ne parcourait que des espaces beaucoup moindres, mais dont le mérite était de peser 33 kilogrammes. Les difficultés augmentent, en effet, très rapidement avec les dimensions.

En résumé, dans l'état actuel de la science, sauf les planeurs du genre Lilienthal et les cerfs-volants, aéroplanes captifs prenant leur appui sur le sol, aucun appareil n'est capable de voler avec la charge d'un homme. Nous sommes encore dans la voie des tâtonnements. Qu'apportera l'avenir? Beaucoup de savants ont la foi. Suivant eux, si les appareils plus lourds que l'air résolvent tardivement le problème de la navigation aérienne, leur jour viendra néanmoins; la victoire de l'aviation sur la direction des ballons sera d'ailleurs complète, car les aérostats portent en eux un germe d'impuissance, l'énormité du volume et la prise donnée à l'action du vent.

FIN DU TOME DEUXIÈME.

TABLE DES MATIÈRES.

	Pages.
CHAPITRE VI. — MÉCANIQUE GÉNÉRALE.....	1
§ 1. <i>Générateurs de vapeur</i>	1
1. Généralités.....	1
2. Types divers de générateurs.....	2
3. Réchauffeurs d'eau d'alimentation. Surchauffeurs de vapeur. Appareils de sûreté.....	8
4. Alimentation; épuration des eaux.....	9
5. Production de la chaleur.....	10
6. Canalisations de vapeur.....	11
7. Associations de propriétaires d'appareils à vapeur.....	12
§ 2. <i>Machines à vapeur</i>	13
1. Progrès généraux réalisés pendant la première moitié du XIX ^e siècle.....	13
2. Progrès généraux réalisés pendant la seconde moitié du XIX ^e siècle. Situation en 1900.....	17
1. Machines à piston.....	17
2. Récepteurs rotatifs.....	44
3. Machines mi-fixes; locomobiles.....	49
3. Statistique.....	51
§ 3. <i>Moteurs thermiques autres que les machines à vapeur</i>	53
1. Considérations générales.....	53
2. Moteurs à air chaud.....	55
3. Moteurs à gaz.....	56
4. Moteurs à pétrole, à gazoline, à alcool.....	62
§ 4. <i>Moteurs hydrauliques</i>	67
1. Généralités sur la force motrice hydraulique.....	67
2. Roues et turbines.....	70
3. Machines à colonne d'eau ou à pression d'eau.....	76
§ 5. <i>Moulins à vent. Moteurs à air comprimé ou raréfié</i>	79
1. Moulins à vent.....	79
2. Machines à air comprimé ou raréfié.....	80
§ 6. <i>Appareils divers de la mécanique générale</i>	83
1. Transmission du travail.....	83
1. Transmission mécanique du travail.....	83
2. Transmissions diverses du travail.....	86

CHAPITRE VI. — MÉCANIQUE GÉNÉRALE. (Suite.)

2. Machines servant à la manœuvre des fardeaux.	87
1. Appareils de levage.	87
2. Ascenseurs et monte-charge.	89
3. Chemins élévateurs.	92
3. Machines hydrauliques élévatoires.	93
4. Machines soufflantes; ventilateurs. Machines aspirantes.	97
5. Appareils de graissage. Joints.	98
6. Mesure de la force et du travail.	100
7. Indicateurs, compteurs, etc.	102
8. Prévention des accidents de machines.	103
§ 7. <i>Machines-outils d'usage général.</i>	104
1. Machines-outils pour le travail des métaux.	104
2. Machines-outils pour le travail du bois.	111
CHAPITRE VII. — ÉLECTRICITÉ.	115
§ 1. <i>Production et utilisation mécaniques de l'électricité.</i>	115
1. Générateurs mécaniques d'énergie électrique.	115
2. Transformateurs.	122
3. Moteurs électriques.	123
4. Distribution, transmission et transport de l'énergie électrique.	126
§ 2. <i>Électro-chimie.</i>	130
1. Piles.	130
2. Accumulateurs.	131
3. Électrolyse.	134
4. Fours électriques.	137
5. Applications diverses.	141
6. Industries connexes.	142
§ 3. <i>Éclairage électrique.</i>	143
1. Historique sommaire.	143
2. Lampes à arc.	145
3. Lampes à incandescence.	149
4. Appareillage.	151
§ 4. <i>Télégraphie et téléphonie.</i>	153
1. Appareils télégraphiques.	153
2. Appareils téléphoniques.	167
3. Matériel des lignes.	169
4. Statistique.	172
CHAPITRE VIII. — GÉNIE CIVIL. MOYENS DE TRANSPORT.	175
§ 1. <i>Matériaux, matériel et procédés du génie civil.</i>	175
1. Matériaux de construction.	175
2. Matériel et procédés des travaux de terrassement.	182

CHAPITRE VIII. — GÉNIE CIVIL. MOYENS DE TRANSPORT. (Suite.)

3. Matériel et procédés des travaux de fondation.....	189
4. Matériel et procédés des travaux de maçonnerie.....	194
5. Matériel et procédés des constructions métalliques.....	198
6. Matériel et procédés divers des chantiers.....	201
§ 2. <i>Travaux publics</i>	202
1. Ponts.....	202
2. Routes et chemins vicinaux.....	216
3. Navigation intérieure.....	220
4. Navigation maritime.....	237
1. Ports et canaux maritimes.....	237
2. Éclairage et balisage des côtes.....	259
5. Travaux de défense contre les eaux fluviales ou contre les eaux de la mer..	265
6. Travaux édilitaires.....	268
7. Télégraphie pneumatique.....	279
8. Charpente métallique des édifices.....	281
§ 3. <i>Carrosserie et charonnage. Sellerie et bourrellerie. Cycles. Automobiles</i>	286
1. Carrosserie et charonnage.....	286
2. Sellerie et bourrellerie.....	291
3. Cycles et motocycles.....	292
4. Automobiles.....	297
§ 4. <i>Matériel des chemins de fer et tramways</i>	307
1. Origine des chemins de fer.....	307
2. Résistances au développement des chemins de fer. Issue de la lutte.....	309
3. Généralités sur les chemins de fer. Tracé et travaux d'art.....	311
4. Voie des chemins de fer.....	314
5. Appareils de sécurité de la voie des chemins de fer.....	318
6. Locomotives.....	322
7. Voitures à voyageurs et wagons à marchandises des chemins de fer.....	329
8. Appareils de sécurité du matériel roulant des chemins de fer.....	335
9. Traction électrique sur les chemins de fer.....	341
10. Chemins de fer de systèmes divers.....	343
11. Tramways.....	347
12. Statistique.....	352
13. Conclusion.....	357
§ 5. <i>Matériel de la navigation de commerce</i>	360
1. Marine à voiles.....	360
2. Marine à vapeur.....	365
3. Faculté totale de transport des principales flottes.....	377
4. Matériel de la navigation fluviale.....	379
5. Matériel de la navigation de plaisance.....	381
6. Sauvetage des navires et des personnes.....	382

CHAPITRE VIII. — GÉNIE CIVIL. MOYENS DE TRANSPORT. (Suite.)

§ 6. <i>Aérostation</i>	385
1. Ballons libres et ballons captifs	385
2. Direction des ballons	392
3. Aérostation militaire	395
4. Aviation	399