http://cnum.cnam.fr
Conservatoire numérique des Arts & Métiers

Auteur ou collectivité : Exposition universelle. 1900. Paris
Auteur : Exposition universelle. 1900. Paris
Titre : Communications présentées devant le congrès international des méthodes d'essai des matériaux de construction. Exposition universelle internationale de 1900. Communications présentées devant le Congrès international des méthodes d'essai des matériaux de construction tenu à Paris du 9 au 16 juillet 1900

Auteur : Exposition universelle. 1900. Paris
Titre du volume : Tome II. Première partie. Métaux. I. Essais mécaniques. II. Etudes des essais de divers métaux et de certaines pièces assemblées

Adresse : Paris : Veuve Ch. Dunod, 1901
Collation : 1 vol. (350 p.-VI f. de pl.) : ill. ; 33 cm
Cote : CNAM-BIB Fol Xae 26 (2) Res
Sujet(s) : Exposition internationale (1900) ; Paris) ; Résistance des matériaux -- Actes de congrès ; Contraintes (mécanique) -- Actes de congrès ; Matériaux -- Comportement -- Actes de congrès ; Construction -- Matériaux -- Essais -- Actes de congrès

URL permanente : http://cnum.cnam.fr/redir?FOLXAE26.2

La reproduction de tout ou partie des documents pour un usage personnel ou d'enseignement est autorisée, à condition que la mention complète de la source (*Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique http://cnum.cnam.fr*) soit indiquée clairement. Toutes les utilisations à d'autres fins, notamment commerciales, sont soumises à autorisation, et/ou au règlement d'un droit de reproduction.

You may make digital or hard copies of this document for personal or classroom use, as long as the copies indicate *Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique http://cnum.cnam.fr*. You may assemble and distribute links that point to other *CNUM* documents. Please do not republish these PDFs, or post them on other servers, or redistribute them to lists, without first getting explicit permission from *CNUM*.

PDF créé le 12/5/2017

COMMUNICATIONS

PRÉSENTÉES DEVANT LE

CONGRÈS INTERNATIONAL DES MÉTHODES D'ESSAI

DES

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

45297. — PARIS, IMPRIMERIE LAHURE
Rue de Fleurus, 9

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

f° Xae 10 f° 33 Fol Xae 26.2

COMMUNICATIONS

PRÉSENTÉES DEVANT LE

CONGRÈS INTERNATIONAL DES MÉTHODES D'ESSAI

DES

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Tenu à Paris du 9 au 16 Juillet 1900

BIBLIOTHEQUE
DU CONSERVATOIRE NATIONAL
des ARTS & MÉTIERS
N° du Catalogue 8° f° Xae 10
Prix ou Estimation
Entrée, le 16 Juin 1902.

TOME II

PREMIERE PARTIE

Métaux

Fol Xae 26-2

I

ESSAIS MÉCANIQUES

II

ÉTUDES DES ESSAIS DE DIVERS MÉTAUX ET DE CERTAINES PIÈCES ASSEMBLÉES

PARIS
V^VE CH. DUNOD, ÉDITEUR
49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS
—
1901

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

COMMUNICATIONS

PRÉSENTÉES DEVANT LE

CONGRÈS INTERNATIONAL DES MÉTHODES D'ESSAI

DES

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

TOME II

PREMIÈRE PARTIE

MÉTAUX

I

L'INFLUENCE DU TEMPS ET DE LA TEMPÉRATURE

SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET LES ESSAIS DES MÉTAUX

COMMUNICATION

Présentée par M. André LE CHATELIER

INGÉNIEUR EN CHEF DE LA MARINE

Les variations éprouvées par les propriétés mécaniques des métaux suivant la durée d'action des efforts auxquels ils sont soumis, et suivant les températures auxquelles ils sont exposés sont les unes et les autres étroitement liées au phénomène général du *recuit* dont les effets, dépendant à la fois du temps et de la température, sont la cause première de ces variations; leurs lois sont simples, mais présentent des exceptions nombreuses, et d'autant plus importantes, qu'elles concernent les métaux les plus usuels; en réalité, ces lois ne s'appliquent qu'aux métaux simples, cuivre, argent, aluminium, etc., et à quelques alliages; mais de nombreux alliages et surtout le fer et l'acier s'en écartent complètement; le fer et l'acier présentent en particulier, à ce point de vue, des propriétés très spéciales, qui sont dues, d'une part à une transformation mal connue, paraissant se rattacher à celles d'où résultent les effets de la trempe, et qui se produit au-dessus de 80° sous l'influence de déformations permanentes, d'autre part à la texture moléculaire spéciale qu'ils possèdent à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'état recuit, texture qui est la cause du phénomène bien connu du palier dans l'essai de traction, et qui modifie profondément leurs propriétés de résistance au choc aux températures basses, ou même à la température ordinaire.

Nous commencerons dans cette étude par faire l'exposé des lois générales du recuit et des conséquences qui en résultent au point de vue de l'influence du temps, en indiquant les précautions qu'il peut être utile de prendre pour que leurs effets ne faussent pas les résultats des essais pratiques des métaux; nous indiquerons ensuite les résultats actuellement acquis sur les caractéristiques des propriétés mécaniques des métaux aux diverses températures; nous étudierons enfin les faits spéciaux si intéressants présentés par le fer et l'acier, soit aux températures élevées, soit aux basses températures, soit sous l'influence d'efforts rapides ou de chocs.

La plus grande partie des expériences que nous citerons sont extraites d'une série d'essais que nous avons exécutés de 1888 à 1892 sur les propriétés mécaniques de divers métaux[1]; l'influence du temps a été peu étudiée en dehors de ces essais; il n'en est pas de même de celle de la température qui a été depuis longtemps l'objet d'expériences nombreuses; nous ne ferons pas l'historique de ces expériences; cet historique a été fait en 1896 par M. le professeur Ledebur[2] dans un mémoire trop connu pour qu'il soit utile de le reproduire, même en partie, et auquel nous emprunterons seulement les résultats qui nous paraissent présenter le plus grand intérêt au point de vue de cette étude dans laquelle nous nous proposons surtout d'exposer les connaissances actuellement acquises.

1. Ces essais ont été de deux sortes : 1° des essais faits surtout au point de vue théorique et qui ont été exécutés sur des métaux étirés en fils fins, procédé qui, en raison de ses multiples avantages et de sa précision, se prête seul à ce genre d'études; 2° des essais de traction sur les métaux usuels à différentes températures, qui ont été exécutés dans le laboratoire de la Compagnie des chemins de fer de l'Est.

Les résultats de ces essais ont été donnés dans les publications suivantes :

Revue générale des sciences pures et appliquées, numéro du 16 août 1891. Étude sur les propriétés mécaniques des métaux.

Génie civil, 1891. Influence de la température sur les propriétés mécaniques des métaux.

Commission des méthodes d'essais des matériaux de construction. Rapports sur l'influence de la durée sur les résultats des essais des métaux et sur l'influence de la température sur les propriétés mécaniques des métaux.

2. *Influence de la température sur les propriétés résistantes des métaux, en particulier du fer*, par M. A Ledebur, traduction par M. S. Jordan. *Bulletin de la Société d'encouragement*, août 1899.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PREMIÈRE PARTIE

MÉTAUX AUTRES QUE LE FER ET L'ACIER

1

LE RECUIT ET SON INFLUENCE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MÉTAUX

Définition. — Toute déformation permanente éprouvée par un métal a pour effet d'élever sa limite élastique et sa charge de rupture, et de diminuer l'allongement qu'il est encore susceptible de fournir; le métal est dit *écroui*; un métal écroui, après avoir été chauffé à une température supérieure à celle de l'écrouissage, revient partiellement à son état primitif; on dit qu'il est *recuit*; sa limite élastique et sa charge de rupture sont plus faibles qu'après écrouissage, et son allongement est plus grand.

Lois du recuit. — Les lois du recuit sont les mêmes pour tous les métaux; seuls, le fer et l'acier n'y obéissent pas jusqu'à la température de 250° environ. Ces lois sont les suivantes :

1° L'effet du recuit à une température donnée va en augmentant avec sa durée; mais il augmente de moins en moins à mesure que cette durée se prolonge et tend vers une limite qui dépend de la température et du degré initial d'écrouissage du métal;

2° L'effet du recuit atteint en pratique sa limite d'autant plus vite que la température est plus élevée; aux températures les plus basses il faut plusieurs heures; aux températures plus élevées, il suffit de quelques minutes;

3° L'effet du recuit prolongé est d'autant plus intense que la température est plus élevée;

4° L'effet du recuit se fait en pratique sentir à partir d'une température variable avec la nature du métal et avec le degré d'écrouissage initial; en réalité, le recuit commence dès la température ordinaire, mais ses effets sont peu marqués et ne concernent guère que la malléabilité jusqu'à une température, qui est d'autant plus basse, pour un métal donné, que l'écrouissage initial est plus intense; à partir de cette température commence une zone dans laquelle de faibles variations de température produisent une diminution marquée de la limite élastique et de la charge de rupture; puis à mesure que la température s'élève l'augmentation des effets du recuit s'atténue et devient insensible à une température très inférieure au point de fusion du métal; le recuit est alors complet; le métal possède la limite élastique et la charge de rupture les plus faibles dont il soit susceptible, et en même temps l'allongement le plus grand.

La figure 1 donne les courbes représentant la charge de rupture après recuits de durée variable, à différentes températures, d'un échantillon de cuivre primitivement écroui par une série de tréfilages.

On voit qu'à 200° l'influence du recuit est relativement faible; à cette température le recuit est très lent; au bout de 4 heures il n'avait pas atteint sa limite; un essai d'une durée de 10 heures avait en effet encore abaissé la charge de rupture de 2 kilogrammes; entre 200° et 300° les effets du recuit s'accentuent beaucoup; ensuite il faut une élévation de tempéra-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ture assez forte pour produire un effet marqué. On voit également sur ces courbes qu'aux températures élevées la limite du recuit est atteinte assez rapidement.

Les autres métaux donnent des résultats analogues; ainsi l'argent pur écroui commence

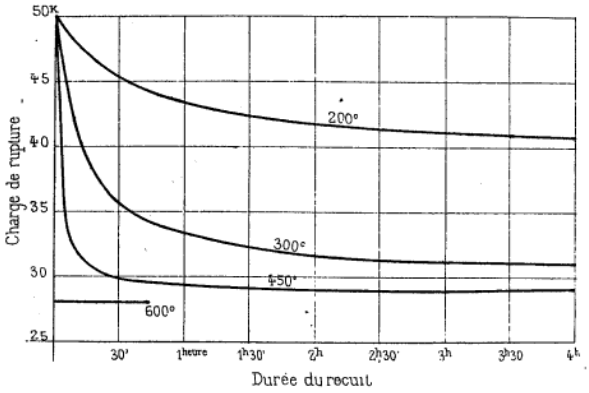


Fig. 1.

à se recuire très sensiblement à 100°; le recuit devient très actif entre 100° et 200°; au-dessus de 200° ses effets augmentent peu et la charge de rupture après recuit prolongé reste stationnaire dès 250°; il suffit d'ailleurs des 250° d'un recuit de quelques minutes pour atteindre cette limite de recuit.

Influence de la composition chimique du métal. — Les impuretés contenues dans les métaux modifient, même à très faible dose, les effets du recuit; elles ont toujours, *quelle que soit leur nature*, pour effet de le retarder; le métal le plus pur est celui pour lequel le recuit à une température donnée est le plus rapide, et produit les effets les plus complets; c'est aussi celui pour lequel le recuit commence à agir sur la valeur de la charge de rupture, à la température la plus basse. Les courbes de la figure 1 sont relatives à du cuivre impur; alors que pour ce cuivre le recuit à 200° est très lent et n'a encore produit au bout d'une heure qu'une diminution de 5 kilogrammes de la charge de rupture, du cuivre électrolytique se recuit très rapidement à 200°; au bout d'une heure sa charge de rupture a diminué de 15 kilogrammes; à 300° il se recuit presque complètement en quelques minutes[1].

Cristallisation par recuit. — Quand on recuit un métal à une température supérieure à celle à partir de laquelle le recuit est complet, on observe souvent une diminution simultanée de la charge de rupture et de l'allongement, diminution qui s'accentue rapidement à mesure que l'on se rapproche du point de fusion; on constate en même temps que le métal prend une texture cristalline, et c'est cette texture qui est la cause de la réduction de la résistance et de la malléabilité.

Cette cristallisation par recuit présente une importance pratique considérable; elle est bien connue pour l'acier et existe pour tous les métaux; son examen ne rentre pas dans le cadre de cette étude; nous indiquerons seulement qu'elle paraît intimement liée à la nature des impuretés contenues dans le métal; elle est peu sensible pour les métaux très purs et se manifeste surtout dans les métaux qui contiennent des éléments fusibles ou susceptibles de donner avec eux des composés fusibles à température assez basse; c'est ainsi qu'agissent le carbone et le phosphore dans l'acier. En voici un exemple très net : après avoir recuit pendant cinq minutes au rouge trois échantillons d'argent de composition différente, nous avons obtenu les résultats suivants :

Composition.	Charge de rupture.	Allongement.
Argent pur	18kg 8	45 %
Argent à 1 % de cuivre	22kg 7	40
Argent à 1 % d'étain.	12kg 0	3

1. Cette influence de la pureté du métal sur le recuit présente une grande importance en pratique: elle explique pourquoi les tuyaux de vapeur en cuivre électrolytique résistent, en général, assez mal aux pressions élevées correspondant à des températures voisines de 200°.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le même échantillon d'argent à 1 % d'étain donnait après recuit prolongé à 300° une charge de rupture de 22kg,8 avec 40 % d'allongement.

Cet exemple montre les précautions qu'il est nécessaire de prendre pendant le recuit; un recuit à température trop élevée peut altérer profondément les propriétés mécaniques d'un métal impur, et il est toujours préférable de faire un recuit prolongé à température assez basse.

Recuit spontané. — L'expérience montre que le recuit se produit non seulement sous l'influence d'une élévation de température, mais aussi à la température à laquelle a été produit l'écrouissage; en un mot, un métal qui vient d'être écroui, et qui est abandonné à lui-même, se recuit partiellement. On peut le constater par différents procédés; par exemple, un fil de cuivre, après avoir subi rapidement plusieurs passages à la filière, est aigre et cassant; abandonné à lui-même il reprend une certaine malléabilité, et l'on constate même une légère diminution dans sa charge de rupture; cette propriété permet d'étirer indéfiniment le cuivre à la filière, à condition que chaque passage soit suivi d'un repos permettant au recuit d'agir et de restituer au métal une partie de sa faculté d'allongement. On peut également constater le recuit spontané, soit en agissant par traction avec une charge constante, soit en faisant un essai avec une machine à manomètre; dans le premier cas on observe que, sous l'influence du recuit, le métal soumis à l'action d'une charge constante s'allonge pendant très longtemps; l'allongement, très rapide au début, est de moins en moins rapide et tend vers une limite déterminée; le temps pendant lequel on peut le suivre ne dépend que de la précision des moyens de mesure dont on dispose; dans le deuxième cas, si après avoir rapidement amené la charge à une valeur déterminée, on abandonne le métal à l'action produite par la colonne manométrique, on voit le niveau de celle-ci baisser d'abord assez vite par suite de l'allongement que prend le métal sous l'influence du recuit, puis de plus en plus lentement. Pour la plupart des métaux usuels, le recuit spontané ne produit que des effets peu marqués à la température ordinaire, et on ne l'observe que dans les essais un peu précis; le zinc cependant en donne un exemple très remarquable; ce métal est susceptible de supporter pendant un temps assez court des charges relativement élevées atteignant 25 kilogrammes par millimètre carré, et cependant sa charge de rupture réelle, c'est-à-dire la charge la plus forte qu'il puisse supporter indéfiniment sans se rompre, est peu supérieure à 2 kilogrammes par millimètre carré. Voici deux expériences faites sur des fils de zinc et qui montrent nettement l'influence du recuit spontané; la première a consisté à suspendre à un fil de zinc une charge de 6 kilogrammes par millimètre carré, et à l'abandonner à l'action de cette charge jusqu'à la rupture qui s'est produite au bout de 10 heures environ; les allongements mesurés à différents intervalles ont été les suivants :

Temps écoulé depuis la mise en charge :	5′	10′	2h	6h	9h	10h	10h 10′ (rupture)
Allongement %	1,33	6	20	61	102	126	173

La deuxième expérience a consisté à essayer le même fil avec une machine à manomètre en élevant rapidement la charge à 26 kilogrammes par millimètre carré et en la laissant ensuite décroître par suite de l'allongement pris par le fil sous l'influence du recuit spontané; on a relevé les charges à divers intervalles.

Tension initiale.	26kg	par m/m carré
— au bout de 15″	11,6	—
Tension au bout de 1′	7kg,6	par m/m carré
— — 10′	3,6	—
— — 2h	2,36	—
— — 8h	2,2	—

Dans les deux cas l'action du recuit spontané est restée appréciable pendant longtemps.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II

N LUENCE DU TEMPS SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MÉTAUX AUTRES QUE LE FER ET L'ACIER

L'influence du temps sur les propriétés mécaniques des métaux autres que le fer et l'acier, est la conséquence directe des lois générales du recuit.

1° ESSAIS FAITS A LA TEMPÉRATURE ORDINAIRE

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, un métal soumis à l'action d'une charge constante s'allonge pendant un temps très long sous l'influence du recuit spontané; mais en pratique, sauf pour le zinc, l'allongement atteint sa limite au bout de quelques minutes; les charges voisines de celles qui sont susceptibles de produire la rupture donnent seules des effets appréciables pendant un temps assez long.

C'est sur la charge de rupture que l'influence du temps a le plus d'importance; si, dans un essai de traction, on augmente rapidement la valeur des efforts, le recuit spontané n'agira que partiellement et le métal supportera à chaque instant une charge supérieure à celle qu'il équilibrerait si on l'abandonnait au recuit spontané; la charge maximum, ou charge de rupture, sera par suite aussi supérieure à la charge maximum qu'il pourrait supporter pendant un temps très long, et elle lui sera d'autant plus supérieure que l'essai aura été plus rapide; autrement dit la charge de rupture mesurée à l'essai de traction est d'autant plus élevée que l'essai a une durée plus courte. L'expérience vérifie cette conclusion; en voici des exemples :

	Durée de l'essai. . .	30″	1′	5′	15′	60′
		—	—	—	—	—
Charge de rupture	Zinc	28kg	24kg	21kg	16kg5	11kg5
	Aluminium . . .	14,9	14,6	14,4	14,2	13,4
	Cuivre	27,8	27,1	26,3	25,8	25,1

Ces expériences ont été faites sur des fils; les résultats des essais sur barreaux des dimensions usuelles sont beaucoup moins nets, en raison des perturbations produites : 1° par les irrégularités de section et les défauts d'homogénéité, 2° par l'échauffement qui se produit dans les essais rapides.

Charge de rupture réelle. — Ce qu'il est intéressant de connaître au point de vue pratique, c'est la charge la plus élevée que le métal peut supporter indéfiniment sans se rompre, charge que nous appelons charge de rupture réelle; pour l'obtenir avec précision, il faut faire des essais de durée de plus en plus longue, en maintenant la vitesse d'allongement bien constante dans chaque essai; en mettant en courbe les résultats obtenus, on peut en déduire par extrapolation la charge de rupture réelle d'une façon assez exacte; on peut encore, si on dispose d'une machine à manomètre, faire un premier essai lent d'une durée de 5′ à 10′ qui donne une valeur approximative de la charge de rupture; puis, recommençant l'essai sur un échantillon identique, on cesse d'agir après avoir amené rapidement la charge à la valeur trouvée dans l'essai précédent; la colonne manométrique baisse peu à peu et la valeur qu'elle indique quand elle reste stationnaire donne une valeur très approchée de la charge de rupture réelle; les charges de rupture réelles ainsi obtenues pour les échantillons de zinc, d'aluminium et de cuivre ayant donné dans les essais à vitesses variables les résultats indiqués ci-dessus ont été :

Zinc	2kg	par m/m carré
Aluminium	11kg	—
Cuivre	23kg5	—

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On voit que la charge de rupture réelle du cuivre est inférieure de 4 kilogrammes à celle obtenue dans l'essai d'une durée de 30″; mais comme nous l'avons dit on n'obtient pas des différences aussi importantes dans les essais usuels sur barreaux, et dans ces essais on peut en pratique négliger l'influence du temps; il suffit de conduire l'essai assez lentement pour que la rupture n'intervienne qu'au bout de 5′ à 10′; la charge de rupture obtenue sera supérieure de 2 kilogrammes environ à la charge de rupture réelle mais sera très suffisante pour les besoins usuels; ce qui importe seulement, c'est de faire tous les essais dans des conditions de vitesse analogues, afin qu'ils soient comparables entre eux.

Allongement. — Les expériences faites sur des fils montrent que l'allongement proportionnel augmente avec la vitesse de traction; mais l'allongement mesuré dans les essais usuels sur barreaux n'éprouve pas de variations sensibles.

En résumé, dans les essais pratiques faits à la température ordinaire, l'influence du temps est négligeable; il suffit de donner à ces essais une durée de quelques minutes pour être dans de bonnes conditions. Dans les essais faits au point de vue de recherches théoriques, il est au contraire nécessaire d'en tenir compte.

2° ESSAIS FAITS A DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES

Dans les essais faits à différentes températures en vue d'étudier les propriétés mécaniques des métaux, soit au point de vue théorique, soit au point de vue de leur emploi dans la construction des chaudières et des machines à vapeur, il est indispensable, sous peine de s'exposer à de très graves erreurs, de recuire au préalable les métaux à une température élevée, ou tout au moins à une température plus élevée que celles auxquelles seront faits les essais; si l'on néglige cette précaution, et si par exemple on essaye à 200° du cuivre écroui, on aura des résultats très variables avec la durée de l'essai, par suite de l'effet du recuit qui sera plus ou moins complet suivant cette durée, et en tout cas très éloignés de la résistance réelle à cette température. Pour mieux fixer les idées voici les résultats donnés à 250° par un fil de cuivre écroui d'une résistance de 50 kilogrammes par millimètre carré à 15°

Durée de l'essai.	20″	10′	30′
Charge de rupture	34kg	24kg7	18kg

la charge de rupture a diminué de moitié quand la durée de l'essai a passé de 20″ à 30′.

C'est à cet effet du temps sur les essais faits à chaud qu'il faut attribuer les divergences énormes qui existent dans les chiffres donnés par divers expérimentateurs pour la résistance du cuivre à 200°; les chiffres obtenus ont varié de 18 à 26 kilogrammes et en réalité la résistance du cuivre pur à cette température est peu supérieure à 15 kilogrammes.

Même quand on opère sur des métaux recuits, il est utile, dans les essais faits aux températures élevées, de tenir compte de l'influence du temps, telle qu'elle résulte, comme nous l'avons indiqué ci-dessus, du recuit spontané; cette influence devient en effet très sensible à certaines températures, même dans les essais faits sur barreaux; voici, à titre d'exemple, les résultats obtenus sur des barreaux de cuivre de 16 millimètres de diamètre :

CUIVRE ROUGE (Barreaux de 16 millimètres de diamètre et 140 millimètres de longueur)

	200°			330°			440°			
Durée de l'essai	45″	1′ 50″	10′	2′ 15″	10′	20′	56″	2′	5′ 30″	17′ 30″
Charge de rupture	20kg.40	18kg.60	17kg.90	15kg.70	15kg.20	14kg.70	10kg.60	9 kg. 70	8 kg. 20	7 kg. 82
Allongement %	39,00	35,00	36,00	37,90	34,40	31,10	21,00	16,20	12,90	11,40

Ces chiffres montrent qu'à ces températures, l'influence du temps sur les résultats des essais prend une importance pratique réelle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MÉTAUX AUTRES QUE LE FER ET L'ACIER

Nous ne reviendrons pas dans ce chapitre sur les modifications éprouvées par les propriétés mécaniques des métaux sous l'influence plus ou moins prolongée d'un chauffage à une température supérieure à la température ordinaire, ces modifications ayant été indiquées dans le chapitre relatif au recuit. Nous indiquerons seulement les modifications éprouvées par ces propriétés mécaniques dans les essais effectués à différentes températures.

Il n'a pas été fait d'expériences sur les propriétés mécaniques des métaux autres que le fer et l'acier à des températures inférieures à la température ordinaire, et en fait de tels essais ne présenteraient aucun intérêt pratique.

Les essais faits à des températures supérieures à la température ordinaire nécessitent,

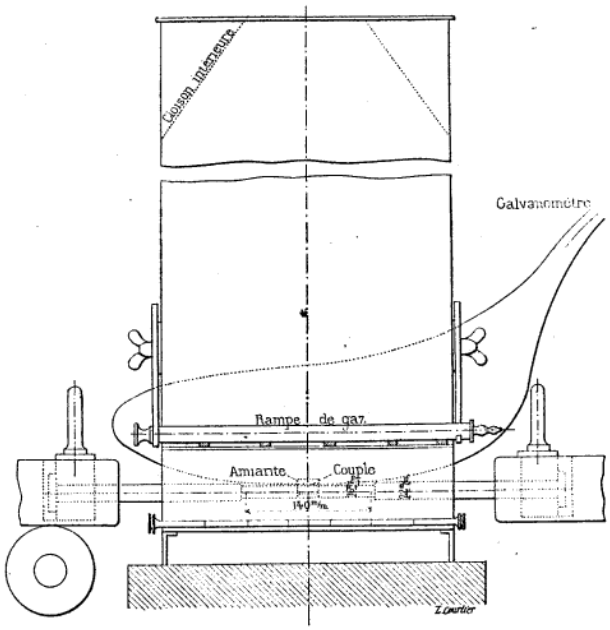


Fig. 2.

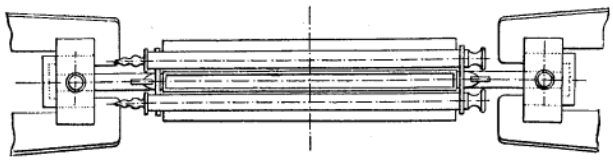


Fig. 3.

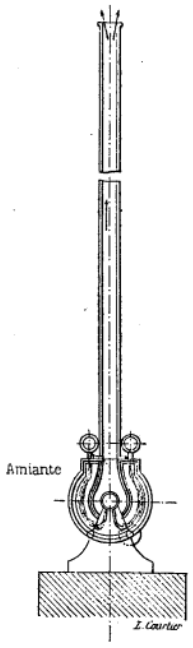


Fig. 4.

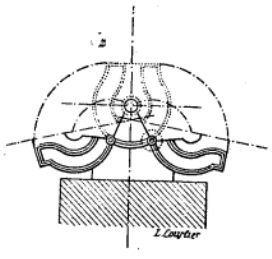


Fig. 5.

pour donner des résultats un peu précis, certaines précautions qui n'ont pas toujours été prises par les expérimentateurs qui se sont occupés de cette question. La première est celle que nous avons indiquée dans le chapitre précédent; il est indispensable, comme nous l'avons montré, d'opérer sur des métaux préalablement recuits. Le chauffage des barreaux d'essais et la mesure de leur température présentent aussi quelques difficultés; si les essais

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

doivent être limités à une température de 250°, le procédé le plus précis consiste à employer un bain d'huile dans lequel sont plongés le barreau d'essai et les mâchoires de la machine de traction; le dispositif de ce genre, qui a été employé par M. Charpy pour ses expériences sur les laitons[1], est particulièrement recommandable et permet de faire des essais d'une grande précision; le barreau plongé dans l'huile est tenu par de fortes pièces en **U** renversé qui le relient aux mordaches de la machine d'essai en passant par-dessus le bord de la cuve; on évite ainsi l'emploi de presse étoupes ou toute autre disposition analogue.

Quand les essais doivent dépasser la température de 250° il devient nécessaire de recourir au chauffage au gaz; les figures 2, 3, 4 et 5 représentent l'appareil que nous avons employé dans les expériences que nous avons exécutées au laboratoire de la Compagnie des chemins de fer de l'Est. Il se compose d'une double enveloppe en cuivre rouge surmontée d'une cheminée à laquelle sont suspendues latéralement (fig. 3) deux rampes à gaz à flamme renversée. L'enveloppe intérieure est interrompue à sa partie inférieure, pour laisser passer le courant des gazs chauds qui contournent le barreau d'essai; on obtient ainsi une grande uniformité de température sur la circonférence du barreau; pour faciliter la mise en place du barreau, l'appareil est divisé dans le sens de sa longueur en deux parties qui se rabattent sur charnières; la température est évaluée au moyen du couple thermo-électrique de M. H. Le Chatelier, placé au milieu du barreau et isolé du courant de gaz chauds par un tampon d'amiante. Cet appareil donne un chauffage rapide et nous avons pu faire des essais à des températures variant de 70° à 800°; le défaut de ce dispositif est que le barreau se refroidit par conductibilité et qu'aux températures élevées, la température n'était pas uniforme sur la longueur calibrée de 140 millimètres; néanmoins jusqu'à 250° elle était bien uniforme ainsi que l'ont montré les mesures d'allongement qui étaient faites de 2 en 2 centimètres.

Dans les tableaux d'essais que nous donnerons ci-dessous, nous désignerons par

- T la température.
- t la durée de l'essai.
- L la limite élastique.
- R la charge de rupture.
- A l'allongement %.
- $\frac{S'}{S}$ le coefficient de contraction ou rapport de la section de rupture à la section initiale.

Nos essais ont été faits sur des barreaux de 16 millimètres de diamètre, et de 140 millimètres de longueur calibrée, répondant à la formule $L = \sqrt{100\,S}$.

CUIVRE ROUGE

Voici les résultats que nous avons obtenus avec du cuivre pur recuit.

T degrés	t —	R kilogr.	A % —	$\frac{S'}{S}$
15	4′	23,1	47	0,375
110	9′	20,4	41	0,303
200	45″	20,4	38	0,377
200	1′50″	18,6	35	0,381
200	10′	17,9	36	0,375
330	10′	15,2	34	0,526
430	8′	12,7	17,8	0,733
530	6′	7,2	16,4	0,777

Des barreaux ayant subi un nouveau recuit de 30′ au rouge ont donné :

T degrés	t —	R kilogr.	A % —	$\frac{S'}{S}$
15	15′	21,6	47,8	0,384
170	6′30″	18,34	37	0,427
330	8′30″	14,4	32,5	0,516

1. Charpy. Recherches sur les alliages de cuivre et de zinc. *Bulletin de la Société d'encouragement* de février 1896.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans ces essais l'influence du temps a été très nette à 200°; la charge de rupture a varié de 20kg,4 à 17kg,9 et la charge de rupture réelle peut être évaluée à 17 kilogrammes pour les barreaux n'ayant pas subi le recuit de 30′ au rouge. Ces essais et d'autres que nous avons faits sur du cuivre électrolytique en fil nous ont conduit à admettre, pour la résistance du cuivre rouge pur et complètement recuit, la formule

$$R = 21^{kg} - 0{,}025\ T,$$

formule qui est applicable jusqu'à 200° et correspond à cette température à une résistance de 16 kilogrammes.

Comme nous l'avons indiqué à propos du recuit, la résistance que possédera vers 200° du cuivre écroui, après un chauffage prolongé à cette température, dépendra beaucoup de sa pureté; pour du cuivre électrolytique, qui est actuellement le plus employé pour les tuyaux de vapeur, on ne peut pas compter sur une résistance supérieure à 18 kilogrammes, quel que soit l'écrouissage initial.

Les chiffres donnés ci-dessus pour la striction montrent que la malléabilité du cuivre diminue beaucoup au-dessus de 300°; mais cette question ne présente plus grand intérêt, l'emploi de ce métal étant généralement abandonné pour les foyers de chaudières.

Le chauffage du cuivre à une température élevée, surtout dans une flamme oxydante, peut être la cause d'une altération analogue à celle produite par la cristallisation par recuit, mais qui paraît due surtout à une oxydation se propageant peu à peu de la surface au centre; elle est très rapide pour les cuivres impurs, mais se produit aussi au bout d'un temps assez long pour le cuivre électrolytique; le cuivre ainsi altéré se gerce superficiellement au moindre pliage; si l'altération a pénétré jusqu'au centre il se brise. Cette altération a été le plus souvent la cause des avaries, ou des éclatements des tuyaux en cuivre soudé. M. Parker a fait à ce sujet des expériences très instructives; des barrettes découpées dans un tuyau soudé qui avait éclaté lui ont donné :

A distance de la soudure.	R = 23kg8	A = 33 %
Dans le voisinage de la soudure.	R = 17kg5	A = 4,6 %

Ces chiffres montrent les dangers que peuvent présenter les tuyaux en cuivre soudé, même quand ils ne doivent contenir que de la vapeur à faible pression.

FONTE

La fonte conserve une résistance presque constante jusque vers 500°; cette résistance diminue ensuite rapidement; les expériences que nous avons faites à ce sujet et celles d'Howard sont concordantes.

BRONZE D'ÉTAIN

La détermination de la résistance à chaud du bronze d'étain présente un grand intérêt en raison de l'emploi courant de ce métal pour la confection des accessoires de chaudières et de tuyautages. Les expériences faites, en 1877, par l'amirauté anglaise sur des bronzes contenant 2 % de zinc et des teneurs variables en étain, avaient indiqué que, pour certains bronzes, il y avait une perte de résistance considérable vers 200°; le bronze phosphoreux, au contraire, donnait une décroissance régulière de la charge de rupture.

Ces expériences ont été reprises par le professeur Unwin, qui a obtenu les résultats suivants :

T	R	
degrés	Bronze ordinaire.	Bronze phosphoreux.
15	18kg2	25kg
175	»	19,2
193	19,2	»
208	17,2	»
260	12,3	17,3

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On remarque, dans ces chiffres, que la résistance du bronze ordinaire, peu variable jusqu'à 200°, a ensuite décru très rapidement; pour le bronze phosphoreux, au contraire, la décroissance est lente au-dessus de 200°.

Voici enfin les résultats que nous avons obtenus sur un bronze à 10 % d'étain et 3 % de zinc :

T	R	A
degrés	kilogr.	%
15	15,90	5,7
140	16,58	7,08
230	14,43	3,9
250	13,16	4,2
300	12,04	2
350	10,95	1,42
415	6,35	»

Jusqu'à 250°, la décroissance de la résistance a été très faible : elle s'est accentuée au-dessus de 300°. En somme, les résultats obtenus jusqu'ici sur le bronze sont assez discordants; la chute de résistance se produit, dans certains cas, à partir de 200°; dans d'autres cas seulement, au-dessus de 300°; il est probable que ces divergences tiennent en grande partie à l'état de porosité du métal; le bronze est rarement bien compact, quand il est préparé sans l'emploi d'un désoxydant; on comprend que, dans un bronze poreux, il puisse se produire vers 200°, température voisine du point de fusion de l'étain, une liquation qui, amenant la désagrégation de l'alliage, diminue sa résistance; les résultats donnés par le bronze phosphoreux qui, bien que pouvant être plus souffleux que le bronze ordinaire, est un métal plus compact, semblent confirmer cette hypothèse. Nous ajouterons que, dans nos essais sur des fils de bronze pur à 10 % d'étain, nous avons toujours obtenu, au-dessus de 200°, une chute très rapide de la résistance et de l'allongement, qui paraissait due à une décomposition de l'alliage, cette température n'étant pas assez élevée pour qu'il puisse se produire des phénomènes d'oxydation.

Quoi qu'il en soit, le bronze d'étain ne paraît pas présenter une sécurité absolue aux températures voisines de 200°; il est possible que des bronzes de même composition, mais de structure ou de compacité différentes, se comportent très différemment, et, en l'absence de renseignements plus précis, le plus prudent est de proscrire, comme l'a fait la marine française, l'emploi du bronze d'étain pour les pièces destinées à recevoir de la vapeur à une pression supérieure à 15 kilogrammes.

LAITONS ET BRONZES SPÉCIAUX

Voici les résultats que nous avons obtenus avec du laiton laminé à 30 % de zinc environ :

T	t	R	A	$\frac{S'}{S}$
degrés	—	kilogr.	—	
15	30′	32,6	46,4	0,448
80	5′	31,9	45,5	0,531
160	9′	30,9	42,8	0,567
230	11′	28,06	17,8	0,786
330	5′	22,11	5,7	0,897
330	17′	18,09	2.8	0,931

La résistance, l'allongement et la striction décroissent régulièrement jusqu'à 230°; au-dessus de 300°, la chute est très brusque et, ainsi que l'indiquent les deux essais de durée différente à 330°, il semble se produire une décomposition de l'alliage.

Les résultats obtenus par M. Charpy[1] sur du laiton fondu à 33 % de zinc conduisent à des conclusions analogues :

T	L	R	A	$\frac{S'}{S}$
degrés	kilogr.	kilogr.	—	
15	9,3	32,7	66	0,42
150	10,3	28,7	39,6	0,63
200	10,7	26,7	33	0,63
225	9,3	22,7	20,5	0,78
250	9.3	20	15	81

1. Mémoire déjà cité.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On remarque seulement que la chute de résistance se produit à une température plus basse; ces expériences donnent, en outre, ce renseignement intéressant que la limite élastique n'éprouve pas de réduction jusqu'à 250°.

Dans la catégorie des laitons se range une série d'alliages appelés improprement bronzes spéciaux ou bronzes à haute résistance, dont les plus connus sont les suivants:

Métal Roma.	Bronze manganèse.	Métal Bull.
Métal Delta.	Bronze Stone.	Laiton d'aluminium.

Tous ces alliages sont des laitons à 40 % de zinc, forgeables à chaud, préparés avec l'aide d'un désoxydant, phosphore, manganèse ou aluminium, et contenant souvent des quantités appréciables de divers métaux, fer (métal delta), manganèse, aluminium, etc. Ils présentent, pour le moulage, quelques difficultés au point de vue des soufflures qui y sont souvent nombreuses; mais en dehors de ces soufflures, ils sont, probablement par suite de l'emploi d'un désoxydant, plus compacts que le laiton ordinaire fondu, et, par suite, donnent des chiffres de résistance et d'allongement qu'on n'obtient qu'avec le laiton laminé ou le laiton coulé en pièces de forme très simple; en outre, ils présentent cette propriété précieuse que leur résistance à la rupture décroît assez lentement quand la température s'élève jusqu'à 250° ou 300°; à 200°, d'après des expériences faites au Laboratoire de la marine, elle varie des 70/100 aux 85/100 de sa valeur à 15°; à 250°, elle est encore supérieure aux 60/100 de cette valeur; la limite élastique est la même à 250° qu'à 15°; à 200°, elle est plus élevée; quant à l'allongement, il augmente en général jusqu'à 200°. Ces alliages présentent, par suite, une sécurité complète pour les pièces qui doivent recevoir de la vapeur à une pression élevée, et la marine française a rendu leur emploi réglementaire, concurremment avec l'acier moulé, pour les pressions supérieures à 15 kilogrammes. Les conditions de recette qu'elle impose sont les suivantes :

	L	R	A
	—	—	—
A 15°	12kg	35kg	18 %
A 215°	15kg	25kg	20 %

Ces conditions ont été déterminées à la suite d'essais comparatifs exécutés au Laboratoire de la marine sur les différents alliages de l'espèce.

BRONZES D'ALUMINIUM

Les bronzes d'aluminium présentent peu d'intérêt au point de vue pratique; il est, en effet, très difficile d'obtenir avec eux des moulages sains; la variation de leur résistance avec la température présente un fait tout à fait spécial; entre 80° et 150°, ils éprouvent une perte brusque de résistance; ainsi du bronze à 9 % d'aluminium, ayant une charge de rupture de 40 kilogrammes à 15°, donne 32 kilogrammes à 117° et 17 kilogrammes seulement à 180°. Aussi ces métaux ne sont pas susceptibles d'être employés aux températures élevées.

NICKEL

Le nickel présente, au point de vue de l'influence de la température, une particularité intéressante; sa charge de rupture reste invariable jusqu'à 300°; c'est le seul métal qui possède cette propriété; au-dessus de 300°, elle paraît décroître rapidement; mais ce fait n'est pas certain, les essais ayant été faits sur des fils fins et ayant pu être faussés par des phénomènes d'oxydation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DEUXIÈME PARTIE

FER ET ACIER

I

INFLUENCE DU TEMPS SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU FER ET DE L'ACIER A LA TEMPÉRATURE ORDINAIRE

L'influence du temps sur les propriétés mécaniques du fer et de l'acier à la température ordinaire est peu sensible toutes les fois qu'il s'agit d'efforts appliqués lentement; quand il s'agit d'efforts agissant rapidement, de chocs, elle prend, au contraire, pour les fers et aciers *recuits et refroidis lentement*, une importance énorme, et les qualités de résistance au choc de ces fers et aciers n'ont aucun rapport avec celles qui résultent de l'essai de traction; un fer ou un acier recuit, donnant de très bons résultats à l'essai de traction, peut se briser au choc en n'absorbant qu'une quantité de force vive minime; autrement dit, *il est fragile*; cette fragilité, bien connue aux basses températures, existe également à la température ordinaire; elle devient apparente pour une vitesse au choc variable avec la composition chimique et est particulièrement prononcée pour les aciers phosphoreux; c'est ainsi qu'on a vu des cornières en acier phosphoreux, ayant donné d'excellents résultats à la traction, se briser comme du verre en tombant d'une hauteur de $1^m,50$ au moment où on les déchargeait du wagon. Il y a là un ensemble de faits d'une importance capitale, et d'ailleurs peu connus, que nous exposerons avec quelques détails.

1° INFLUENCE DU TEMPS DANS L'ESSAI DE TRACTION

Voici les résultats que nous avons obtenus dans des essais de durée variable sur un fil d'acier extra doux recuit :

Durée totale de l'essai. . .	très grande	60″	40″	20″	10″	5′
	—	—	—	—	—	—
	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
Limite d'élasticité apparente. .	22,4	27,4	28,0	29,3	31,0	32,6
Charge de rupture.	33,0	34,4	34,6	34,8	35,2	35,6

Ce que nous désignons sous le nom de limite d'élasticité apparente est la valeur de la charge qui correspond à l'arrêt de la colonne manométrique, arrêt accompagné d'un allongement notable sans variation de charge; cette valeur augmente très rapidement avec la vitesse de la traction; nous reviendrons plus loin sur ce fait d'une importance capitale.

La charge de rupture augmente aussi avec la vitesse de traction, mais assez lentement, et dans une proportion analogue à celle que l'on observe avec les autres métaux tels que le cuivre.

Dans les essais sur barreaux, on observe également l'augmentation de la limite élastique apparente et de la charge de rupture avec la vitesse de l'essai; l'allongement qui est la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

somme de l'allongement proportionnel et de l'allongement dû à la striction suit une loi différente; il résulte d'un assez grand nombre d'essais, qu'il nous paraît inutile de reproduire, qu'il passe par un minimum pour une durée d'essai voisine de une minute; pour les essais plus courts, la charge de rupture et l'allongement vont en croissant avec la vitesse de traction; pour les essais plus lents, la charge de rupture décroît quand la vitesse de traction diminue et l'allongement augmente; la somme de ces deux quantités reste à peu près constante.

2° INFLUENCE DES CHOCS ET FRAGILITÉ

Comme nous l'avons indiqué plus haut, les propriétés mécaniques des fers et aciers *recuits* sont, au choc, complètement différentes de ce qu'elles sont à la traction.

Les premières expériences faites à ce sujet sont dues à M. Considère [1].

Ces expériences ont été faites sur des fils de fer soumis à l'action d'un mouton de 500 grammes tombant d'un fil à l'autre de hauteurs de plus en plus grandes. Les fils étaient suspendus à un ressort taré dont la bande indiquait dans chaque essai l'effort maximum supporté par le fil. Chaque fil ne recevait qu'un seul choc; les résultats obtenus ont été les suivants :

Tension dynamique du fil en kilogrammes . .	23kg.10	27kg.72	30 kg. 8	33 kg.	34 kg.	35kg.72	39 kg. 6 (rupture)
Allongement %	0,5	2,6	5	6	7,4	11,6	19

Des fils du même rouleau, essayés à la traction lente, ont donné :

Tension statique en kilogrammes.	18 kg. 5	22 kg. 5	24 kg. 5	26 kg. 7	27 kg. 9 (rupture)
Allongement %.	0,2	4,6	6,7	10	19

On voit, d'après ces chiffres, que la tension dynamique qui produit un allongement déterminé est beaucoup plus forte que la tension statique occasionnant le même allongement, et que la tension dynamique qui, en un seul choc, a produit la rupture, est de 42 % supérieure à la charge de rupture à la traction.

Le même fil supportait, avant de se rompre, six applications d'un effort dynamique de 34 kilogrammes; dix répétitions d'un effort de 27kg,62, presque égal à la charge de rupture statique, ne produisaient qu'un allongement de 8,3 %.

Ces expériences montrent qu'il n'y a aucun rapport entre les effets produits par des efforts appliqués rapidement et ceux produits par la traction lente, et en même temps que la résistance au choc paraît beaucoup plus considérable que celle qui résulterait des résultats donnés par la traction. Mais ceci n'est vrai que jusqu'à une certaine limite; M. Considère observa, en effet, qu'en augmentant la hauteur de chute, la rupture se produisait presque sans allongement, et que le fil n'absorbait plus qu'une quantité minime de force vive.

Nous avons repris ces essais sur un fil d'acier extra-doux de 0mm,78, soumis à l'action d'un mouton de 800 grammes tombant de hauteurs croissantes; voici les résultats obtenus :

Hauteur de chute. . .	0m10	0m20	0m40	0m70	1m	1m50	1m70
Allongement % sur 150 millimètres à la rupture. . . .	45	45	40	30	23	15	8
Nombre de chocs nécessaires pour produire la rupture. .	9	5	2	1	1	1	1

1. Résistance au choc et fragilité du fer. Association des ingénieurs des Ponts et Chaussées du sud-ouest, 1888.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On voit que l'allongement à la rupture, d'abord considérable (45 %), a éprouvé une décroissance très rapide à partir du moment où la rupture s'est produite au premier choc. En même temps, les fils ainsi brisés au premier choc présentaient un aspect tout particulier représenté par la figure 6.

Fig. 6.

L'allongement était localisé ; en certains points, le fil avait conservé son diamètre initial ; dans les régions où il s'était allongé, la réduction de diamètre correspondait exactement à l'allongement de 45 %, obtenu dans les deux essais où la hauteur de chute n'avait été que de $0^m,10$ à $0^m,20$; dans ces deux essais, le même phénomène s'était produit aux premiers chocs ; mais la localisation de l'allongement avait disparu aux chocs suivants. On reproduit facilement cette localisation de l'allongement en rompant brusquement un fil recuit dont on saisit chaque extrémité dans une pince, à condition d'opérer à une température inférieure à 10° ; cet effet s'exagère, comme nous le verrons plus loin, à mesure que la température s'abaisse, et à —60°, on obtient ainsi la rupture avec un allongement inférieur à 1 %.

En rapprochant ces faits de l'augmentation considérable de la limite d'élasticité apparente avec la vitesse de traction, nous avons été conduits à en donner l'explication suivante :

Si l'on se reporte aux résultats que nous avons donnés ci-dessus, on voit que la limite élastique apparente croît, avec la vitesse de l'essai, beaucoup plus vite que la charge de rupture ; dans l'essai d'une durée de 5 secondes, elle ne diffère plus que de 3 kilogrammes de la charge de rupture ; dans un essai d'une durée plus rapide, probablement 2 secondes à 1 seconde, elle lui deviendrait égale ; les courbes représentant les essais à différentes vitesses affecteraient une allure analogue aux courbes C, C′, C″ (fig. 7) ; la droite D repré-

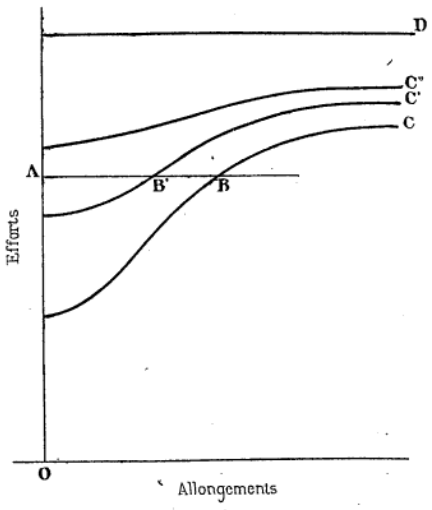


Fig. 7.

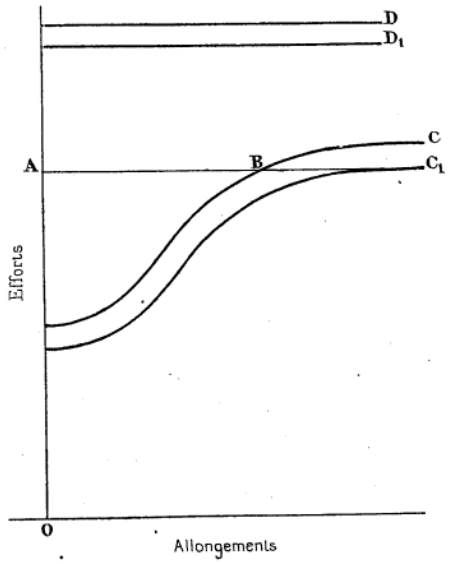


Fig. 8.

senterait l'essai d'une durée assez courte pour que la limite élastique apparente fût égale à la charge de rupture. Nous remarquerons tout d'abord que les allongements AB, AB′, qui correspondent à une même valeur de la charge, sont d'autant plus faibles que la vitesse de traction est plus grande. C'est le résultat obtenu par M. Considère dans ses essais de choc.

Considérons maintenant un barreau présentant des différences d'homogénéité ou de section telles qu'une de ses parties soit moins résistante que l'autre ; les courbes de déformation de ces deux parties à la traction lente seront C et C_1 (fig.8) ; à la traction assez rapide,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour égaliser la limite élastique apparente et la charge de rupture, elles deviendront D et D_1; dans le premier cas, l'allongement à la rupture sera AC_1 pour la partie la plus faible où se produira la rupture, et AB pour la deuxième partie; l'allongement total sera plus faible que si tout le barreau avait été homogène et s'était déformé suivant la courbe C_1; dans le deuxième cas, la partie la plus faible s'allongera seule, suivant la droite D_1; l'autre partie ne fournira aucun allongement puisque la charge n'aura pas atteint la valeur correspondant à sa limite d'élasticité; l'allongement total sera donc très réduit; si, par exemple, les deux parties du barreau sont égales, il ne sera que la moitié de ce qu'il aurait été pour un barreau homogène. C'est exactement ce que nous avons obtenu dans nos essais de choc; sous l'influence de défauts d'homogénéité, ou plutôt d'une inégalité dans la répartition des efforts due aux vibrations produites par le choc, l'allongement s'est localisé et il en est résulté une réduction de l'allongement total; cet effet va, d'ailleurs, en s'accentuant à mesure que la vitesse au choc augmente; pour une vitesse au choc suffisante, l'allongement sera localisé en un point; la rupture n'absorbera alors qu'une quantité de force vive très faible, comme l'a observé M. Considère; le métal fera alors preuve d'une fragilité spéciale, que nous appellerons *fragilité élémentaire*.

L'égalité de la limite élastique apparente et de la charge de rupture, pour une vitesse d'effort suffisante, sur laquelle repose cette théorie, n'est d'ailleurs pas une hypothèse; on l'observe aux basses températures dans les essais de traction rapide; ainsi, à — 60°, nous l'avons obtenue dès que la durée de l'essai est devenue inférieure à 1 minute.

En résumé, la fragilité élémentaire doit être considérée comme une conséquence directe des variations qu'éprouve, avec la vitesse d'action des efforts, cette limite d'élasticité d'un caractère tout spécial que l'on constate dans le fer et l'acier recuits et refroidis lentement, et qui se manifeste par un arrêt brusque de l'ascension de la colonne manométrique, arrêt suivi d'un allongement de 2 à 3 % sans augmentation de charge. Cette limite élastique apparente paraît elle-même correspondre à la dislocation du carbure de fer qui existe dans les aciers recuits, englobant plus ou moins complètement la ferrite, qui en est le constituant malléable et qui ne peut se déformer qu'après la désagrégation de ce carbure.

La fragilité élémentaire n'existe que pour les fers ou aciers recuits et refroidis lentement; les aciers simplement trempés ou mieux ayant subi la double trempe[1] en sont exempts; voici les résultats que nous avons obtenus avec le fil d'acier extra-doux qui avait servi aux expériences de traction et de choc indiquées ci-dessus; à la traction d'une durée de 1 minute, ce fil donnait une charge de rupture d'environ 35 kilogrammes avec 36 % d'allongement; aux chocs de faible hauteur, $0^m,10$ et $0^m,20$, il se brisait avec 45 % d'allongement; aux chocs de plus grande hauteur, l'allongement allait en décroissant rapidement, comme nous l'avons indiqué; le même fil, ayant subi la double trempe, donnait à la traction une charge de rupture de 45 kilogrammes avec 25 % d'allongement; essayé au choc à des hauteurs de chute croissantes, il a toujours donné le même allongement de 25 % jusqu'à une hauteur de chute de 2 mètres, sans que, dans aucun cas, il ne se produisît de localisation de l'allongement.

Enfin, essayé à la traction rapide à — 60°, il a encore donné le même allongement, alors que, dans les mêmes conditions, le fil recuit se brisait avec un allongement inférieur à 1 %. Voici, enfin, une expérience qui montre nettement la différence d'action des efforts rapides, suivant qu'il s'agit d'un métal recuit ou trempé; nous avons trempé, avant de les essayer au choc, des fils sur la moitié de leur longueur, par simple refroidissement à l'air, ce qui élevait d'environ 10 kilogrammes la charge de rupture; aux chocs de faible hauteur, la rupture se produisait, comme à la traction, dans la partie recuite; mais, au-dessus d'une certaine hauteur de chute, $1^m,50$ dans les conditions de nos essais, elle s'est produite uniformément dans la partie trempée; la limite élastique avait suffisamment augmenté, sous l'influence de l'augmentation de vitesse du choc, pour devenir supérieure à la charge de rupture de la partie trempée.

La fragilité élémentaire doit être considérée comme la cause première des phénomènes si curieux de fragilité que présente parfois l'acier à la température ordinaire, et que l'on

1. La double trempe est une trempe à la température normale de trempe de l'acier, suivie d'un revenu à une température inférieure à 700° et d'une deuxième trempe; cette opération, dont les effets ont été reconnus pour la première fois par M. Walrand, rend l'acier complètement exempt de fragilité et lui donne une texture nerveuse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

observe le plus souvent avec les aciers phosphoreux ou les aciers cristallisés par un chauffage à température trop élevée; ces aciers peuvent donner d'excellents résultats à l'essai de traction, et cependant ils font preuve d'une fragilité extrême; pour les premiers, la présence du phosphore facilite l'apparition de la fragilité élémentaire par l'action très nette qu'il exerce sur l'élévation de la limite d'élasticité apparente qui est, comme on le sait, beaucoup plus élevée, à charge de rupture égale, pour les aciers phosphoreux que pour les aciers très purs; pour les seconds, la cristallisation agit dans le même sens, parce qu'elle crée une hétérogénéité qui facilite énormément la localisation de la déformation; mais un acier très pur et très homogène deviendra aussi fragile pour une vitesse de choc suffisante, s'il *a été recuit et refroidi lentement*, que le sont les aciers phosphoreux ou cristallisés pour des vitesses de choc très faibles.

Il résulte de tout ce qui précède deux conclusions importantes :

1° *L'essai de traction ne donne aucune indication sur les qualités de résistance des aciers destinés à supporter des efforts rapides ou des chocs;* il est indispensable, pour déterminer ces qualités, de faire appel à des essais spéciaux, d'ailleurs très simples, dits *essais de fragilité*, dont nous parlerons plus loin.

2° *L'acier destiné à supporter des efforts rapides ou des chocs ne doit jamais être recuit et refroidi lentement;* il doit toujours être soumis à une trempe plus ou moins complète, ou mieux à la double trempe.

L'examen des propriétés mécaniques du fer et de l'acier aux basses températures va nous donner une confirmation complète de ces deux conclusions.

II

INFLUENCE DES BASSES TEMPÉRATURES SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU FER ET DE L'ACIER

On a depuis longtemps constaté que le fer et l'acier étaient beaucoup plus fragiles aux basses températures, même dès 0°, qu'à la température de +15°. L'importance considérable, au point de vue pratique, de cette constatation a conduit de nombreux expérimentateurs à faire des essais variés sur les propriétés mécaniques du fer et de l'acier, jusqu'à des températures voisines de —80°. Ces expériences, qui sont complètement décrites dans le mémoire de M. Ledebur, ont donné des résultats généraux assez concordants; les essais de traction ont tous montré que la limite d'élasticité et la charge de rupture allaient en croissant quand la température s'abaissait; quant à l'allongement, tantôt on a trouvé qu'il augmentait, tantôt qu'il diminuait, ce qui, dans ce dernier cas, résultait sans doute d'un défaut d'uniformité de température des barreaux essayés; les expériences du professeur Steiner, en 1891 et 1892, ont montré que la striction, qui est la meilleure caractéristique de la malléabilité, ne variait pas sensiblement jusqu'à —60°. Il résulte, en somme, des nombreux essais de traction exécutés dans cet ordre d'idées, que les qualités de résistance du fer et de l'acier vont en s'améliorant jusqu'aux températures les plus basses que l'on ait atteintes, et que la malléabilité ne varie pas sensiblement; ce résultat est, en apparence, en contradiction avec l'augmentation de la fragilité qui avait été constatée et dont ces essais avaient pour but de rechercher la cause; il confirme la conclusion à laquelle nous avait conduit l'étude de la fragilité élémentaire, à savoir que l'essai de traction ne donne aucun renseignement sur la résistance au choc du fer et de l'acier.

Les essais au choc à basse température ont été également nombreux et ont, en général, indiqué une augmentation de raideur et de fragilité; mais les traitements, état de recuit ou de trempe, subis par les métaux employés ont été rarement indiqués, de sorte qu'on ne peut en tirer de conclusion précise. Les plus intéressants ont été exécutés par le capitaine Bernardon en 1890 à la Fonderie de Bourges. Ces essais ont porté sur de l'acier à canon recuit et refroidi lentement et sur le même acier trempé et recuit. Les barreaux d'essai avaient 130 millimètres de longueur et 20 millimètres de côté; ils étaient posés sur des couteaux distants de 100 millimètres. Le poids du marteau était de 18 kilogrammes; la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

hauteur de chute de 1m,20 pour l'acier non trempé et de 1m,50 pour l'acier trempé. On a essayé, dans chaque cas, environ 20 barreaux à +15° et 20 barreaux qui étaient refroidis tous les deux coups à —60°.

ACIER NON TREMPÉ.

	à + 15°.	à — 60°.
Nombre de barreaux ayant résisté à dix-huit coups.	13	0
Moyenne des nombres de coups supportés par tous les barreaux. . .	14,6	5,9
Flèche au cinquième coup	13 mm. 1	9 mm. 7

Pour les barreaux essayés à —60°, la flèche est la moyenne donnée par 8 barreaux, les seuls qui aient résisté à 5 coups.

ACIER TREMPÉ.

	à + 15°.	à — 60°.
Nombre de barreaux ayant résisté à dix-huit coups	18	9
Moyenne des nombres de coups supportés par tous les barreaux. . .	17	12,57
Flèche au quinzième coup	26 mm. 8	22 mm.

Ces essais ont mis nettement en évidence la fragilité de l'acier recuit aux basses températures et la grande supériorité de l'acier trempé; si les barreaux avaient subi la double trempe, il est probable qu'à —60° ils auraient donné les mêmes résultats qu'à +15°; ils ont, en même temps, montré que l'augmentation de raideur de l'acier recuit est bien plus grande à —60° que celle de l'acier trempé.

Nous terminerons en indiquant les expériences que nous avons exécutées. La figure 9

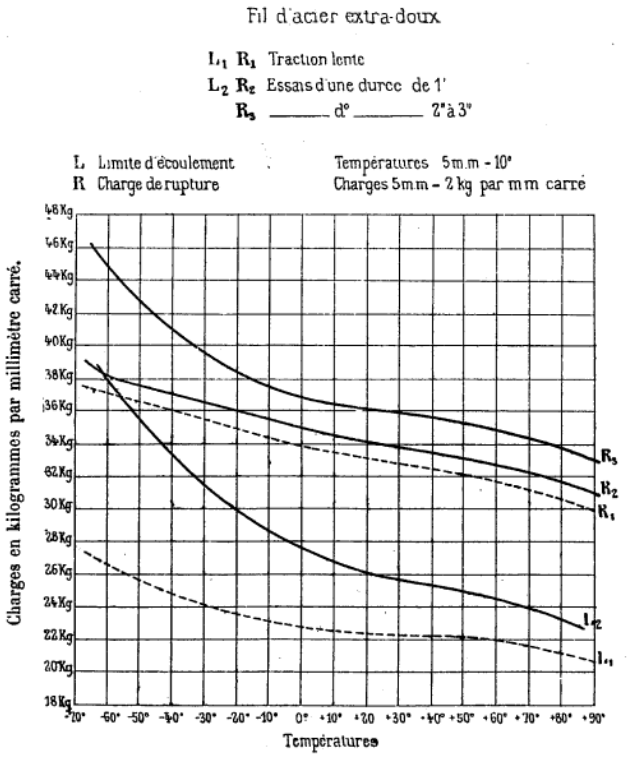


Fig. 9.

représente les résultats obtenus dans une série d'essais faits à des températures rapprochées de +80° à —70°, sur un fil d'acier extra-doux recuit; pour ces essais, le fil traversait, dans un tube en laiton mince de 40 centimètres de longueur, une cuve remplie d'eau

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaude ou d'alcool refroidi avec de l'acide carbonique solide; la longueur du fil essayé avait 150 millimètres et était placée au milieu du tube où elle avait bien exactement la température du liquide contenu dans la cuve.

Les courbes de la figure 9 représentent :

1° Les courbes L_1 et R_1, la limite élastique apparente et la charge de rupture à la traction très lente, d'une durée totale d'au moins 20 minutes.

2° Les courbes L_2 et R_2, la limite élastique apparente et la charge de rupture pour les essais d'une durée totale de 1 minute.

3° La courbe R_3, la charge de rupture dans des essais très rapides, où la rupture était obtenue en 2 ou 3 secondes, ce qu'il est facile de réaliser en réduisant à 1 ou 2 centimètres la longueur du fil en essai.

L'examen de ces courbes conduit aux conclusions suivantes :

1° A la traction très lente la limite élastique et la charge de rupture croissent lentement, et de quantités égales quand la température s'abaisse; cependant à partir de 0° leur augmentation est un peu plus rapide.

2° A la traction d'une durée d'une minute, la limite élastique croît plus vite, quand la température s'abaisse, qu'à la traction lente; cette croissance devient très rapide à partir de 0°, et à — 60° la limite élastique atteint 38 kilogrammes, supérieure de 11 kilogrammes à sa valeur à la traction lente. La charge de rupture croît exactement suivant la même loi qu'à la traction lente, et la courbe qui la représente se raccorde à — 60° avec la courbe des limites élastiques; à cette température, la colonne du manomètre de la machine d'essai s'est élevée jusqu'à la charge de 38 kilogrammes sans qu'il se produise d'allongement, et y est restée stationnaire jusqu'à la rupture qui s'est produite avec 40 % d'allongement.

Nous indiquerons en passant que, dans ces essais d'une durée d'une minute, l'allongement, qui dans les essais sur fils ne représente que l'allongement proportionnel, est allé en croissant régulièrement de 30 % à + 60° à 40 % à — 60°.

3° A la traction très rapide, la charge de rupture suit la même loi qu'à la traction lente jusqu'à — 10°; à partir de cette température, elle suit la même loi que la limite élastique dans la traction d'une durée d'une minute; on peut en conclure avec certitude que l'égalité de la limite élastique et de la charge de rupture qui, pour l'essai d'une durée d'une minute, n'était atteinte qu'à — 60°, est atteinte dès — 10° pour des essais plus rapides, provoquant la rupture en 2 ou 3 secondes; on remarque en même temps combien s'élève, avec la vitesse de traction, cette valeur commune de la limite élastique et de la charge de rupture qui atteint 45 kilogrammes à — 60°.

Enfin, en produisant dans les mêmes conditions la rupture en moins d'une seconde, nous avons vu la localisation de l'allongement se manifester dès + 10°, s'accentuer à mesure que la température s'abaissait, et à — 60° l'allongement était localisé en un point unique, celui où s'était produite la rupture; le fil de 150 millimètres de longueur s'était à peine allongé de 1 millimètre; la fragilité avait été atteinte bien que l'effort ayant amené la rupture ne fût pas, comme rapidité, assimilable à un choc.

Nous rappellerons que, ainsi que nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent, le même fil d'acier, ayant subi la double trempe, donnait toujours les mêmes résultats quelle que fût la vitesse du choc; il en a été de même jusqu'à — 60°; on observait seulement une augmentation progressive de la charge de rupture, mais l'allongement restait toujours le même, quelle que fût la vitesse de traction; quant à la limite d'élasticité apparente, elle n'existait pas pour ce fil doublement trempé et avec elle avaient disparu tous les phénomènes qui dans l'acier recuit conduisent à la fragilité.

Les essais représentés par la figure 9 confirment complètement tout ce que nous avons dit dans le chapitre précédent de la fragilité élémentaire, et l'influence des basses températures peut se résumer en ceci :

Pour une vitesse d'effort donné, la limite élastique apparente croît rapidement quand la température s'abaisse et par conséquent, la vitesse d'effort, nécessaire pour faire apparaître la fragilité élémentaire, est d'autant plus faible que la température est plus basse.

Cet énoncé suffit à rendre compte de tous les faits observés jusqu'ici.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III

INFLUENCE DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU FER ET DE L'ACIER

L'influence des températures élevées sur les propriétés mécaniques du fer et de l'acier ont été l'objet de très nombreuses expériences, parmi lesquelles nous citerons en particulier celles de James Howard à l'arsenal de Watertown (États-Unis) en 1890, et les essais du laboratoire royal de Charlottenbourg, 1887 à 1890. Nous rendrons plus spécialement compte de celles que nous avons faites à la même époque sur des fils et sur des barreaux, parce que les températures y ont été déterminées avec une grande exactitude, et que l'influence du temps qui présente, aux températures élevées, une grande importance pour le fer et l'acier, y a été plus complètement étudiée.

Nos essais sur barreaux, exécutés au laboratoire de la Compagnie des Chemins de fer de l'Est, avec l'appareil de chauffage au gaz que nous avons décrit ci-dessus, ont porté sur deux variétés de fer, du fer de Suède d'une résistance de 30 kilogrammes à la température de 15° et du fer fin d'une résistance de 37 kilogrammes, et sur quatre variétés d'aciers, deux aciers extra-doux, un acier doux et un acier dur. Tous ces métaux avaient été recuits au rouge. Nos essais sur fils ont porté sur une grande variété d'aciers recuits, depuis l'acier extra-doux jusqu'à l'acier de la qualité employée pour les cordes à piano.

LIMITE D'ÉLASTICITÉ APPARENTE.

Les essais sur fils ont donné une décroissance très marquée de la limite apparente d'élasticité jusque vers 100°, ainsi que l'indiquent les courbes de la figure 9. A partir de 80° à 100° cette limite d'élasticité devenait incertaine; on observait souvent des arrêts momentanés de la colonne manométrique pour des charges très faibles; d'autre part, comme nous le verrons plus loin, l'allongement se fait, à partir de cette température, par saccades, ce qui rend très difficile l'appréciation de la limite élastique. Les essais sur barreaux ont aussi indiqué une décroissance de la limite d'élasticité jusqu'à 100°; au-dessus elle paraissait rester constante jusqu'à 250°, puis décroissait rapidement jusqu'à 350°, température à laquelle elle cessait d'être appréciable; mais nous ne considérons pas comme exacts les relevés faits au-dessus de 100°, l'irrégularité de l'allongement à partir de cette température rendant difficile l'observation de la limite élastique.

Les essais du laboratoire de Charlottenbourg ont donné des renseignements plus précis grâce aux courbes qui y ont été enregistrées; ils ont montré que la limite d'élasticité allait en décroissant régulièrement avec la température, et d'une quantité égale pour tous les métaux essayés, 8 à 9 kilogrammes de + 20° à + 300°. Au-dessus de 400°, elle devenait insensible.

CHARGE DE RUPTURE.

Les courbes de la figure 10 représentent les charges de rupture que nous avons obtenues avec le fer de Suède, un acier extra-doux, et un acier doux. Les teneurs en carbone et en manganèse de ces métaux étaient les suivantes :

	Carbone.	Manganèse.
	—	—
Fer de Suède	0,086	0,000
Acier extra-doux	0,163	0,280
Acier doux	0,261	0,615

Les courbes en traits pleins représentent les résultats obtenus à la traction lente, dans des essais d'une durée de cinq à six minutes, et les courbes en pointillé, les résultats donnés par les essais de traction rapide d'une durée de quarante à cinquante secondes.

Si l'on considère les courbes relatives à la traction lente, on constate que la charge de rupture décroît rapidement depuis la température ordinaire jusqu'à une température d'au-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tant plus élevée que le métal est plus dur, 60° pour le fer de Suède, 100° pour l'acier doux, et au delà de laquelle elle se relève rapidement; elle atteint son maximum vers 250° à 300°; la différence entre ce maximum et la charge de rupture à la température ordinaire est presque constante; la valeur de cette différence est de 8 à 10 kilogrammes; nous avons observé le même fait dans les essais sur les fils, et l'acier dur que nous avons essayé en barreaux nous a également donné une augmentation de 8 kilogrammes. Au delà de ce maximum la charge de rupture décroît très rapidement.

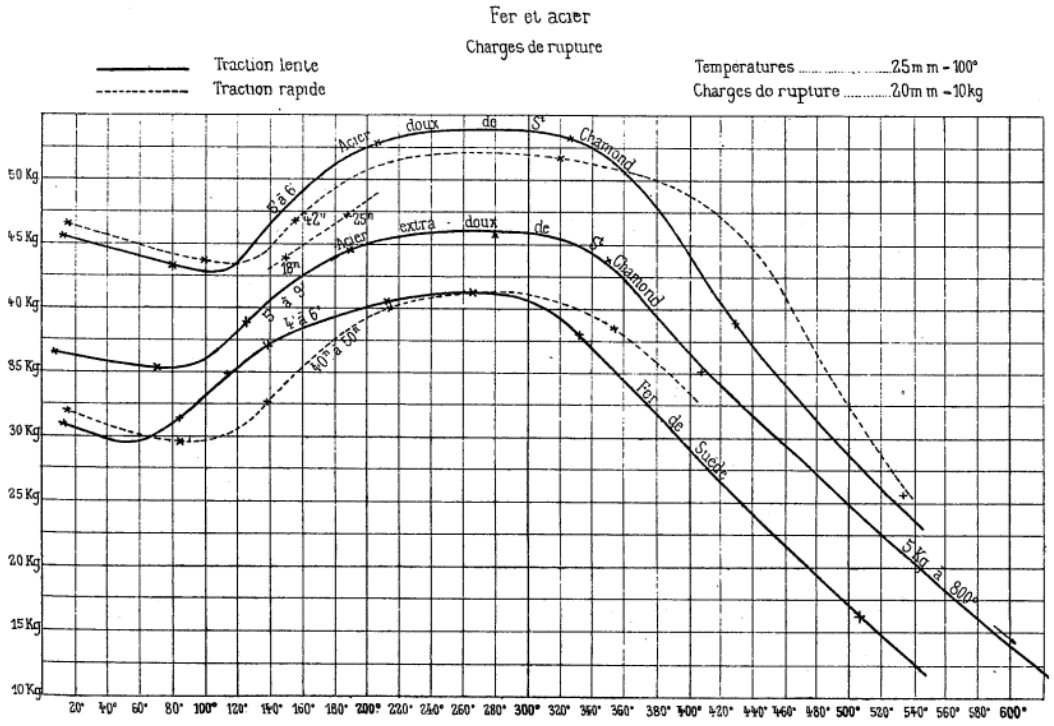


Fig. 10.

Si l'on considère maintenant les essais à la traction rapide, on voit qu'ils ont pour effet de déplacer suivant l'échelle des températures, en leur laissant la même amplitude, les variations de la charge de rupture; ce fait est particulièrement net pour le fer de Suède. L'influence du temps a donc une importance considérable sur ces essais; cette influence apparaît encore plus nettement si l'on augmente la rapidité de l'essai; la figure 10 indique deux essais d'une durée de dix-huit et vingt-cinq secondes faits sur l'acier doux; les points représentant ces essais sont bien au-dessous de la courbe correspondant à la durée d'essai de quarante à cinquante secondes. En voici un exemple encore plus net obtenu sur un fil d'acier extra-doux d'une résistance de 36 kilogrammes environ à + 15°. A 170° ce fil nous a donné

A la traction lente	R = 45kg	A = 10 %
A la rupture produite en 2″	R = 27kg	A = 28 %

Il y a une différence de 18 kilogrammes entre les charges de rupture et un essai plus rapide eût sans doute donné une charge de rupture encore plus faible; remarquons que par contre l'allongement à la rupture rapide est resté considérable.

On voit donc qu'à ces températures la résistance du fer et de l'acier est susceptible de variations énormes suivant la rapidité d'action des efforts.

Au-dessus de 300° les essais les plus rapides donnent au contraire les charges de rupture les plus élevées; en même temps, ainsi que l'a constaté James Howard, la valeur de la charge de rupture des différents aciers tend à devenir la même.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ALLONGEMENT.

A partir de la température où la charge de rupture commence à s'élever, 60 à 100°, l'allongement devient irrégulier; il se fait par saccades; ce fait très net dans les essais sur barreaux est encore beaucoup plus marqué dans les essais sur fils; on constate alors que l'amplitude de ces saccades est d'autant plus grande que le métal est plus dur; elles dépassent rarement 1 % pour l'acier extra-doux; pour de l'acier dur, d'une résistance de 65 kilogrammes à 75°, nous en avons obtenu qui atteignaient 6 %, soit 9 millimètres, la longueur du fil étant de 150 millimètres; il ne s'agissait pas d'ailleurs d'un allongement localisé; l'allongement s'était produit uniformément sur toute la longueur.

L'allongement proportionnel éprouve une chute brusque entre 80° et 100° environ dans la traction lente: ainsi l'acier doux nous a donné 25 % à 80°, et 12,5 à 110°; il se réduit jusqu'à 250° à une valeur d'environ 10 %, la même à peu près pour tous les fers et aciers; ensuite il s'élève, et ainsi que nous l'avons constaté dans les essais sur les fils, il croît avec la température en conservant à peu près la même valeur, quelle que soit la dureté du métal.

En dessous de 200° la vitesse de traction a d'ailleurs une grande influence sur l'allongement proportionnel; l'essai à 170° sur un fil d'acier extra-doux que nous avons cité ci-dessus en est une preuve très nette; au-dessus de 300° les essais les plus lents sont ceux qui donnent les allongements les plus considérables.

La striction décroît sans cesse depuis la température ordinaire jusqu'à 300° ou 350°. A partir de 400° elle augmente très rapidement et devient très forte vers 700° à 800°.

Voici les chiffres obtenus pour l'acier extra-doux de Saint-Chamond:

Température.	15°	75°	190°	280°	350°	410°	470°	800°
Striction $\frac{S'}{S}$	0,349	0,392	0,434	0,473	0,559	0,435	0,316	0,017
Allongement de striction $100\,\frac{S-S'}{S'}$ . .	185 %	153 %	130 %	111 %	78 %	118 %	210 %	5,800 %

Au-dessus de 400° elle a d'ailleurs la même valeur pour tous les aciers; ainsi l'acier dur qui n'avait à 15° qu'une striction de 0,561, donnait à 370° une valeur de 0,448 peu différente de celle indiquée dans le tableau ci-dessus à 410°.

INFLUENCE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU FER ET DE L'ACIER DES DÉFORMATIONS PERMANENTES PRODUITES A UNE TEMPÉRATURE SUPÉRIEURE A 100°.

Les différents essais que nous avons exécutés nous ont montré qu'une déformation très faible, produite à une température comprise entre 100° et 300°, suffisait à modifier profondément les propriétés mécaniques du fer et de l'acier.

En voici deux exemples très nets:

FER DE SUÈDE.

	Essayé à 15°.	Essayé à 15° après allongement de 3 % à 190°.
Charge de rupture	30kg9	38kg14
Allongement sur 140 millimètres.	32,5 %	21 %
Allongement de striction	200 %	170 %

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ACIER EXTRA-DOUX DE SAINT-CHAMOND.

	Essayé à 15°. —	Essayé à 15° après allongement de 3,5 % à 220°.
Charge de rupture	36kg18	39kg5
Allongement sur 140 millimètres.	32,8 %	16,07 %
Allongement de striction	185 %	70 %

On voit de suite que ce très faible écrouissage vers 200° a eu beaucoup plus d'effet sur l'acier extra-doux que sur le fer de Suède, bien que pour ces deux métaux la ductilité à 15° avant altération à 200° fût la même; dans ce cas la différence de dureté et surtout de teneur en carbone (0,06 pour le fer de Suède et 0,163 pour l'acier extra-doux) paraît jouer un rôle prépondérant. Quelques essais de chocs faits par M. Stromayer conduisent aux mêmes conclusions : des fers et aciers ont été soumis à deux chocs identiques au bleu (300°), puis après refroidissement l'essai a été poursuivi jusqu'à rupture; le fer doux a pu encore supporter dix coups du mouton, alors que l'acier doux s'est rompu au deuxième coup et l'acier mi-dur au premier.

Cette altération des propriétés mécaniques du fer et de l'acier, produite par une très faible déformation aux températures supérieures à 100°, est l'indice d'une transformation spéciale, ayant quelques analogies avec la trempe, et à laquelle sont dues les variations de la charge de rupture et de la malléabilité que l'on constate dans les essais faits à ces températures. Cette transformation, comme toutes les transformations moléculaires, exige un certain temps pour se produire et c'est ce qui explique les différences considérables que l'on constate à partir de 80° environ suivant la rapidité de l'essai; dans les essais rapides la transformation reste incomplète, et par suite la charge de rupture est plus faible et l'allongement plus grand que dans les essais lents; à partir de 250° environ, cette transformation se détruit par un effet inverse de recuit, analogue au revenu des aciers trempés, et alors dans les essais rapides le recuit n'a pas le temps d'agir, la charge de rupture conserve une valeur plus grande, et l'allongement une valeur plus faible que dans les essais lents où le recuit a pu détruire plus ou moins complètement la transformation; si on agit par chocs, on constate que ce n'est qu'au-dessus de 500° que le métal reprend sa malléabilité. On peut prouver directement que l'effet des températures supérieures à 300° est dû à un phénomène de recuit; si en effet on chauffe un certain temps à une température supérieure à 300° un fer ou un acier ayant été altéré par une légère transformation à 200°, on constate qu'il a repris presque intégralement sa ductilité.

La nature de cette transformation est actuellement inconnue; il est probable qu'elle se rattache à une de celles qui se produisent dans la trempe.

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LA FRAGILITÉ.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la limite élastique apparente baisse rapidement quand on approche de 100° et vers cette température elle devient un peu incertaine; on peut également remarquer, sur les courbes de la fig. 9, qu'elle est moins influencée par la vitesse de traction. Aussi la fragilité diminue-t-elle en même temps très rapidement; vers 100° l'acier est très peu fragile; à cette température un morceau d'acier, même à cristallisation développée et dans lequel on a pratiqué une entaille, ne se brise au choc qu'après une déformation très accentuée, alors qu'à la température ordinaire il aurait pu se briser presque sans déformation; en même temps l'aspect de la cassure se modifie complètement; on n'y voit plus trace de cristallisation; elle présente un aspect soyeux rappelant un peu le nerf du fer. A une température plus élevée, variable avec la vitesse du choc, on voit de nouveau apparaître la fragilité; mais cette fragilité, qui est bien connue et qu'on appelle souvent fragilité au bleu, est toute différente de la fragilité que l'on constate à la température ordinaire; elle ne peut jamais, quelles que soient les conditions où l'on opère, entraîner la rupture sans déformation; elle paraît résulter uniquement de ce que, à ces températures, la ductilité du fer et de l'acier est beaucoup plus faible qu'à la température

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ordinaire et que, par suite, un métal, qui aurait pu à froid se plier à 180°, peut se rompre à 300° sous un angle relativement faible. Ce n'est pas à proprement parler de la fragilité, et d'ailleurs cette soi-disant fragilité n'est pas spéciale aux ruptures par chocs; elle se manifeste aussi bien sous un effort de flexion lente que sous un effort de flexion par choc; seulement s'il s'agit d'un effort lent, elle apparaîtra dès 200°; s'il s'agit d'un choc, vers 300°, 400° ou 500° suivant la vitesse du choc. La réduction de la ductilité à ces températures est plus apparente dans les essais de flexion que dans les essais de traction où elle n'est révélée que par la mesure de la striction et c'est pour cela qu'elle a attiré davantage l'attention.

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LES ESSAIS DE FRAGILITÉ.

Comme nous l'avons indiqué dans l'étude de la fragilité élémentaire, l'essai de traction ne donne aucune indication sur la résistance de l'acier à la température ordinaire, et il est par suite nécessaire, pour connaître cette résistance, de recourir à des essais spéciaux d'ailleurs fort simples, que l'on appelle *essais de fragilité.*

On peut employer pour ces essais deux méthodes différentes.

La première méthode consiste à pratiquer dans le métal une découpure par une action brusque, poinçonnage ou cisaillage, puis à le plier pour faire apparaître les déchirures qui auront pu être produites par cette action brusque; cette méthode qui a été expérimentée par M. Considère met nettement en évidence la fragilité des aciers phosphoreux; l'essai par pliage sur un trou poinçonné est particulièrement simple et pratique pour l'essai des tôles et profilés; on peut seulement lui reprocher de n'être pas d'une très grande précision, l'action du poinçon pouvant varier d'un trou à l'autre, et de ne pouvoir donner que des indications générales qui d'ailleurs peuvent, en pratique, suffire dans bien des cas.

La deuxième méthode consiste à provoquer la rupture par choc d'un barreau préalablement entaillé, ce qui a pour effet, en créant une section faible, d'exagérer la fragilité en facilitant, dans une très grande mesure, la localisation de la déformation avant rupture. Nous avons présenté en 1892, à la Commission des méthodes d'essai, les premières expériences exécutées par cette méthode; ces expériences avaient été faites en soumettant au choc d'un mouton de 18 kilogrammes des bandes, découpées dans des tôles ou des pièces de forge, qui reposaient sur des appuis par leurs extrémités et avaient été entaillées à leur milieu par un trait de scie d'une profondeur de 1 millimètre; l'angle de pliage à la rupture, ou le nombre de coups de mouton servaient de mesure à la fragilité; ces expériences avaient indiqué qu'il n'y avait aucun rapport entre la fragilité et les résultats de l'essai de traction et avaient montré l'influence du phosphore sur la fragilité; elles avaient également montré qu'un acier fragile après recuit cesse de l'être après double trempe. Cette méthode d'essai a été considérablement perfectionnée par M. Barba, qui a remplacé le choc sur un barreau supporté par deux appuis, par le choc en porte-à-faux à l'extrémité d'un barreau encastré; cette modification augmente beaucoup la précision de l'essai en exagérant la fragilité; on arrive ainsi facilement, pour les aciers un peu fragiles, à provoquer la rupture au premier coup de mouton, et la hauteur de chute qui, pour un mouton de poids donné, et une entaille de forme déterminée, provoquera la rupture au premier choc, donne la mesure de la fragilité. Tous les essais faits depuis dans le même sens ont été exécutés par la méthode des barreaux encastrés de M. Barba avec des variations dans la forme et la disposition des entailles.

Ces essais de fragilité sont d'une extrême simplicité et seuls donnent des renseignements précis sur la qualité de l'acier; aussi ne peut-on trop s'étonner qu'ils ne soient pas encore entrés dans la pratique; la principale raison en est que les différences énormes de qualité qu'ils font ressortir entre des aciers, qui, avec les méthodes usuelles d'essai, paraissaient équivalents, rendent les consommateurs très exigeants et par suite créent de grandes difficultés pour les fabricants; c'est, croyons-nous, pour cette raison que les tentatives faites jusqu'ici, pour introduire ces essais dans les conditions de recette des aciers, n'ont pas réussi. Mais, quand on se sera mieux rendu compte de ce que l'on peut raisonnablement exiger, l'essai de fragilité sur barreau entaillé deviendra l'essai le plus employé pour l'acier, et c'est en vue de cette éventualité prochaine que nous avons été conduit à en parler

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour insister sur l'importance considérable que prendra la température pour ce mode d'essai.

Il suffit de se reporter à ce que nous avons dit de la fragilité élémentaire pour voir que les variations de la température atmosphérique suffiront à produire des variations énormes dans les résultats de l'essai de fragilité; par exemple, une hauteur de chute du mouton qui ne fera pas apparaître la fragilité à 15° la fera apparaître à 5°; si l'on opère par hauteurs de chute croissantes jusqu'à ce qu'on ait atteint la hauteur qui produit la rupture au premier choc, une différence de température de 10° produira dans cette hauteur des variations qui pourront atteindre près d'un mètre, ou même plus. Ce qui intervient pour faire apparaître la fragilité, c'est en effet avant tout la vitesse du choc, et pour un métal donné la vitesse pour laquelle se manifeste la fragilité élémentaire, cause première de la fragilité telle qu'on l'observe en pratique, est très variable dans les limites où oscille la température atmosphérique. Dans nos essais sur barreaux entaillés nous avions constaté l'impossibilité de briser à la température de 25° des aciers qui à 15° se brisaient à un angle de flexion de 90°.

Cette influence de la température sera la seule difficulté des essais de fragilité; elle rendra nécessaire l'établissement de tables de correction basées sur des expériences précises, et permettant de déduire la fragilité à une température prise pour base, 0° par exemple, de celle qui aura été mesurée à la température observée au moment de l'essai. Il faut d'ailleurs remarquer que ces tables de correction devront être établies pour chaque type d'entaille adopté, la forme de l'entaille exagérant plus ou moins la fragilité.

ANDRÉ LE CHATELIER.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II

LE POINÇONNAGE

ENVISAGÉ COMME MÉTHODE D'ESSAI

COMMUNICATION

Présentée par M. BACLE

Le poinçonnage est une des opérations les plus fréquentes dans les travaux d'atelier, elle s'applique en effet à presque toutes les pièces destinées à être assemblées, et qui, par suite, doivent subir un perçage à cet effet, comme les tôles de chaudières ou de ponts, les barreaux et profilés de toute nature. Il serait donc particulièrement intéressant de pouvoir profiter de cette opération pour apprécier en même temps la qualité du métal éprouvé, et utiliser en un mot le poinçonnage comme une véritable méthode d'essai.

On y trouverait, en effet, l'avantage de supprimer toute dépense inutile, de métal, de temps et d'argent, et on reconnaîtra que c'est là une considération des plus importantes si on songe à tous les frais que représente la préparation d'une simple éprouvette d'essai à la traction. Il faut ajouter d'autre part que, le plus fréquemment, cette éprouvette ne peut pas être détachée dans les débouchures de la pièce examinée, elle présente, en effet, un volume trop considérable qu'on ne peut obtenir qu'en sacrifiant souvent une pièce entière.

L'essai ainsi effectué entraîne donc une dépense d'autant plus élevée; et, même dans ces conditions, il reste encore impuissant à fournir les renseignements précis qu'on serait en droit d'exiger pour l'appréciation de la qualité des pièces mises en œuvre, puisqu'il n'a pas pu porter sur ces pièces elles-mêmes, mais seulement sur d'autres de qualité différente peut-être et qui sont devenues inutilisables par ce fait.

On comprend immédiatement, sans qu'il soit nécessaire d'insister davantage, l'intérêt qui s'attacherait à l'utilisation du poinçonnage comme méthode d'essai, lors même qu'il ne fournirait pas des indications aussi précises et bien graduées que le fait l'essai à la traction.

Dans cette pensée, divers expérimentateurs ont entrepris de nombreuses recherches à cet effet, ainsi que nous le dirons plus loin; aucun d'eux n'avait encore fourni toutefois une solution satisfaisante du problème, et la question serait encore à l'étude, si elle n'avait fait récemment, grâce aux travaux de M. Frémont, un pas qu'on peut considérer comme décisif. Par des expériences de précision qui sont de véritables modèles du genre, cet ingénieur distingué a réussi en effet à élucider la théorie de ces deux opérations du cisaillement et du poinçonnage, il a fourni en même temps le moyen simple de représenter les phénomènes dont elles s'accompagnent et de mesurer les efforts développés.

L'importance des résultats ainsi acquis a permis immédiatement d'entrevoir la possibilité d'utiliser dès lors le poinçonnage comme une méthode d'essai, et nous avons aussitôt entrepris à cet effet avec M. Frémont de nombreuses expériences qui ne sont pas encore terminées maintenant.

Nous avons pu cependant montrer déjà, dans une note communiquée à l'Académie des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sciences le 18 novembre 1895, comment il serait possible d'interpréter le diagramme de poinçonnage pour en tirer des indications précises sur la qualité du métal.

Notre collègue M. Barba a montré d'autre part, avec toute l'autorité qui s'attache à ses savants travaux, si remarquables à la fois au point de vue théorique et pratique, que l'essai à la traction, dont la mise en application exige cependant tant de dépenses et de soins spéciaux, est loin de constituer pourtant, surtout dans l'étude des produits de qualité courante destinés aux usages commerciaux, cette méthode réellement irréprochable à laquelle on puisse accorder toute confiance.

On a pu constater trop souvent en effet, ainsi que nous le rappelons dans le rapport général présenté devant la Commission française, que cette épreuve ne répond pas toujours aux sacrifices qu'elle exige, car les résultats qu'elle apporte n'ont jamais la valeur absolue qu'on voudrait leur attribuer, ni au point de vue de la résistance observée, ni surtout à celui de l'allongement.

Ces différences résultent surtout de l'hétérogénéité constitutionnelle du métal, et elles affectent par suite toutes les méthodes d'essai auxquelles on peut avoir recours : celles-ci comportent donc leurs irrégularités inévitables, et il ne semble pas que l'essai par traction en soit mieux à l'abri que les autres méthodes d'épreuve.

L'avantage qu'il présente est de fournir des résultats mieux définis et gradués; mais du moment où il faut renoncer à trouver cette précision absolue qu'aucun essai ne peut comporter, il y a lieu de penser que l'examen du diagramme de poinçonnage pourra fournir dans la plupart des cas, surtout en vue des usages commerciaux, des indications suffisantes sur la qualité des métaux.

On voit alors tous les avantages que présenterait cette méthode pour les praticiens, et dans cette situation nous avons pensé qu'il pourrait convenir de présenter devant le Congrès International l'exposé des recherches que nous poursuivons dans ce sens espérant que nos collègues trouveront quelque intérêt à cette communication.

M. Josiah Smith, ingénieur des forges de Barrow-in-Furness, en Lancashire, paraît être le premier praticien qui ait eu l'idée de faire servir le poinçonnage à l'appréciation de la qualité des produits fabriqués dans l'usine. Il opérait spécialement sur les rails en acier Bessemer sortant du laminoir; au moment du perçage des trous d'éclisse, il observait la pression maxima développée sur le poinçon, et il en concluait la résistance et par suite la qualité du métal.

Dans une intéressante communication présentée le 6 avril 1875 devant la *Société des Ingénieurs civils* de la Grande-Bretagne, M. Smith expose qu'il a pu reconnaître par une expérience déjà longue que l'essai à la traction ne donne trop souvent que des résultats bien incertains, qu'il présente en outre l'inconvénient grave de ne porter que sur un nombre limité de rails qu'il faut sacrifier pour la préparation des éprouvettes.

Il serait certainement préférable, observe-t-il, de pouvoir essayer individuellement chaque rail sans le détériorer, et il estime donc qu'il faut chercher une méthode d'essai susceptible de fournir ce résultat, laquelle du reste pourrait s'appliquer également à toutes sortes de produits autres que les rails.

Or, l'observation de l'effort développé dans la poinçonneuse pour le percement des trous d'éclisses, donne bien une indication précise de la résistance du rail et par suite de la dureté du métal, et on peut admettre que les autres propriétés comme la ductilité variant nécessairement avec celle-ci, se déduisent d'une façon très approximative du résultat ainsi obtenu.

Il est vrai, dit-il, que le poinçonnage produit une certaine altération du métal autour du trou, mais d'après les expériences qu'il a faites sur des métaux de résistance voisine de 48 kilogrammes par exemple, en perçant des trous de 2 centimètres de diamètre, la zone ainsi affectée ne s'étend pas au delà de 2 millimètres autour du trou.

Il suffit donc d'effectuer le poinçonnage en perçant d'abord le trou sur un diamètre inférieur de 4 millimètres au diamètre définitif et de l'agrandir ensuite par un alésage qui aura ainsi pour effet d'enlever la zone altérée.

La *Barrow Hematite Company limited* a pu livrer plus de 100 000 tonnes de rails dont le perçage a été ainsi effectué sans qu'il se soit jamais produit aucune rupture aux trous d'éclisses, et M. Smith considère que cette expérience apporte la meilleure preuve que ce mode de perçage donne bien toute sécurité tant qu'on n'opère pas sur un métal de dureté

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

exceptionnelle, et qu'elle constitue en même temps un excellent essai pratique. M. Smith ajoute que d'autres expériences faites par lui à l'aide d'une poinçonneuse hydraulique de Kirkaldy lui ont montré que l'effort de résistance au poinçonnage peut donner l'indication de nombreuses propriétés des aciers éprouvés, notamment la teneur en carbone, la résistance à la rupture par traction, la ductilité, etc., et servir par suite d'une manière générale à déterminer l'effort que le métal peut supporter sans danger dans les applications industrielles.

M. Smith a résumé ses expériences dans le tableau que nous reproduisons ci-après : celui-ci montre que le poinçonnage de trous de sept huitièmes de pouce (0m,022 de diamètre) sur des tôles de trois quarts de pouce (0.019 d'épaisseur) a exigé des efforts variant de 46.980 à 83.730 kilogrammes lorsque la résistance des rails éprouvés variait elle-même de 48 à 79 kilogrammes par millimètre carré.

TABLEAU I

Résumant les expériences de M. Smith sur le poinçonnage des rails.

NUMÉROS D'ORDRE des barres expérimentées.	POIDS DU RAIL		TENEUR EN CARBONE	EFFORT		EFFORT DE RUPTURE		ALLONGEMENT MESURÉ sur une longueur de 2 pouces (0m,05)	EFFORT DE FLEXION	
	en livres par yard.	en kilogrammes par mètre.		nécessaire pour poinçonner un trou de 7/8" de pouce (0m,022) de diamètre dans une âme de rail de 3/4" (0m,019).	calculé en tonnes françaises.	calculé par pouce carré de la section primitive.	calculé en kilogramme par millimètre carré de la section primitive.		nécessaire pour provoquer une flèche permanente les supports de 36" (0m,914).	calculé en tonnes françaises.
	lb.	Kg.		Tonnes anglaises.	Tonnes.	Tonnes par pouce carré.	Kg.	p. 100	Tonnes anglaises.	Tonnes.
1	75	56.22	0,28	46,25	46,98	30,91	48	37,5	19	19,30
2	»	»	0,28	46,33	47,06	30,08	47	36,5	19	19,30
3	»	»	0,28	46,97	47,71	31,03	48	36,0	19	19,30
4	»	»	0,28	47,18	47,94	31,56	49	35,0	19	19,30
5	»	»	0,29	48,21	48,98	31,53	49	36,0	20	20,32
6	»	»	0,30	48,27	49,04	32,85	51	34,5	20	20,32
7	»	»	0,30	48,50	49,27	33,37	52	32,0	20	20,32
8	»	»	0,29	48,86	49,64	33,07	51	32,0	20	20,32
9	»	»	0,31	48,89	49,67	31,88	50	36,0	20	20,32
10	»	»	0,29	49,00	49,78	32,33	50	37,0	20	20,32
11	»	»	0,31	49,00	49,78	33,37	52	34,0	20	20,32
12	»	»	0,30	49,07	49,85	32,09	50	37,0	20	20,32
13	»	»	0,32	49,41	50,19	31,97	50	33,5	20	20,32
14	»	»	0,31	49,50	50,28	32,75	51	32,0	20	20,32
15	»	»	0,29	49,68	50,47	33,18	52	32,5	21	21,33
16	»	»	0,30	50,00	50,00	33,59	52	36,0	21	21,33
17	»	»	0,30	50,11	50,91	33,08	51	35,0	21	21,33
18	»	»	0,30	50,27	51,07	32,67	51	35,0	21	21,33
19	»	»	0,32	51,05	51,85	33,65	52	32,0	21	21,33
20	»	»	0,32	52,50	53,33	33,49	52	32,0	21	21,33
21	»	»	0,36	56,79	57,69	37,01	58	26,0	23	23,36
22	»	»	0,40	58,16	59,09	37,42	58	26,0	23	23,36
23	»	»	0,40	58,44	59,37	37,93	59	25,0	23	23,36
24	»	»	0,39	61,24	62,21	41,41	65	26,0	24	24,38
25	»	»	0,43	61,34	62,31	39,10	61	22,0	24	24,38
26	»	»	0,44	64,42	65,49	42,82	67	25,0	24	24,38
27	»	»	0,45	65,19	66,23	44,00	69	16,5	26	26,41
28	»	»	0,44	65,31	66,35	39,23	61	24,0	25	25,40
29	»	»	0,50	74,50	75,68	45,79	71	3,0	28	28,44
30	»	»	0,57	82,47	83,78	50,42	79	3,0	31	31,49

L'auteur en conclut que le rapport entre les deux résistances au poinçonnage et à la traction atteindrait en moyenne 0.88.

L'exemple ainsi donné par M. Smith pour l'utilisation du poinçonnage comme méthode

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'essai est resté longtemps sans imitateurs, d'une part sans doute parce que l'observation de l'effort supporté par la poinçonneuse ne pouvait guère se faire facilement que sur les seules machines hydrauliques par l'interposition d'un manomètre donnant la pression de l'eau motrice, d'autre part, peut-être aussi, parce que les indications ainsi recueillies sur ce manomètre ne mesurent pas exactement la pression exercée sur l'outil, ainsi que nous le reconnaîtrons plus loin.

Il est incontestable, en effet, que les frottements absorbent une partie appréciable de l'effort développé, et, en fait, la pression exercée sur le piston hydraulique diffère sensiblement de celle que transmet l'outil de la machine, l'écart résultant varie en outre au cours d'une opération de poinçonnage.

Quoi qu'il en soit, si la méthode a pu être considérée comme abandonnée en quelque sorte après les expériences de M. Smith, cet abandon n'était pas sans provoquer de vifs regrets de la part des ingénieurs praticiens que leurs fonctions appelaient à effectuer les réceptions de produits métalliques et spécialement des rails.

En 1880, M. Sandberg, de Londres, présentait devant l'*Institut américain des ingénieurs des mines* un rapport sur les conditions de réception en usage en Europe pour les fournitures des rails; il rappelait (p. 204) les tentatives déjà faites pour déterminer la dureté de l'acier par la simple observation de l'effort maximum exercé sur l'outil dans le poinçonnage, il ajoutait que, par malheur, l'idée était restée comme mort-née, et il exprimait le regret formel de se trouver toujours dans la nécessité de ne pouvoir faire porter les essais de recette d'un lot de barres sur chacune individuellement, mais sur quelques-unes seulement qu'il fallait sacrifier.

Au cours de la même session de cette Société technique, dans la discussion intervenue au sujet des rails en acier, l'éminent chimiste, dont le nom fait autorité aux États-Unis, M. Dudley, s'associait aux regrets ainsi exprimés, et ajoutait qu'il était fâcheux que la méthode de recette essayée à Barrow-in-Furness n'eût pas reçu d'autre application. Il terminait sa communication par les expressions suivantes que nous traduisons textuellement, parce qu'elles résument d'une façon frappante les critiques formulées d'autre part par M. Barba sur l'essai de traction.

« Pourquoi abandonnerions-nous, disait-il en parlant du poinçonnage, une méthode d'essai qui, pendant de longues années, a donné les meilleurs résultats sur des fournitures représentant plusieurs millions de tonnes, et cela seulement parce qu'il s'agit d'un procédé trop simple, tandis que, au contraire, nous voulons en adopter une autre qui est lente, coûteuse et impraticable, uniquement parce qu'elle est scientifique. »

En 1893, un ingénieur américain, M. Alfred E. Hunt, préoccupé aussi de son côté de l'utilisation du poinçonnage comme méthode d'essai, présentait un mémoire à ce sujet devant le Congrès des ingénieurs réuni à l'occasion de l'Exposition de Chicago; il y reprenait à nouveau les critiques déjà formulées contre les méthodes d'essai généralement en usage.

« Avec ces méthodes, dit-il, le temps nécessaire et la dépense sont si considérables que l'on fait les essais par traction, les analyses chimiques et souvent les essais au choc en trop petit nombre, pour découvrir le manque d'homogénéité du métal et y remédier. En outre, les différences des résultats peuvent être considérables lorsqu'on prélève les éprouvettes en différents points du lingot ou de toute autre pièce qu'il s'agit d'essayer, ou encore dans le cas spécial des essais par traction, lorsqu'on modifie la vitesse, la grandeur de l'effort ou le mode d'application des efforts, ou lorsque ceux-ci ne sont pas dans l'axe des éprouvettes.

« Il y a un autre inconvénient grave ; il n'est pas inhérent aux procédés, il est vrai, mais il crée des ennuis sérieux lorsqu'il s'agit d'élaborer et d'interpréter les spécifications relatives à l'acier pour constructions mécaniques : on resserre tellement les limites dans lesquelles doivent rester ces résultats qu'on arrive à une conclusion excessive, et qu'il devient très difficile de trouver de l'acier convenant aux constructions mécaniques.

« Cet état de choses n'est pas seulement préjudiciable aux établissements métallurgiques, il mécontente les ateliers et les constructeurs. Souvent des retards onéreux résultent du refus d'une livraison que le fabricant avait expédiée avec confiance dans le délai stipulé, parce que le métal est un peu en dehors des limites étroites de la spécification, et cependant, dans bien des cas, l'inspecteur, l'établissement métallurgique n'ont pas le moindre doute que l'acier rebuté aurait rendu les mêmes services pour l'usage auquel il était destiné,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qu'une grande partie des pièces acceptées et ayant donné les résultats d'essais répondant aux spécifications.

« Cette situation nuit beaucoup aux intérêts de l'ingénieur qui élabore les cahiers des charges, et quelquefois aussi à la qualité du métal qu'il emploie, car elle tend à faire douter les agents subalternes et les praticiens de l'utilité des spécifications et de la nécessité de s'y conformer loyalement, et à leur faire croire que l'ingénieur qui a rédigé le cahier des charges ne sait pas ce qu'il lui faut en réalité. »

L'auteur résume ensuite, de la manière suivante, la méthode qu'il propose de substituer à celle qu'il vient de critiquer :

« Cette méthode consiste, dit-il, à poinçonner ou à cisailler, à entailler ou à travailler à la broche des pièces d'une épaisseur de métal déterminée, et à comparer l'effort nécessaire pour ce travail avec celui qu'exigent des pièces étalons traitées de même.

« On peut aussi faire la comparaison entre le travail effectué, ou des facteurs du travail développé à différents moments des opérations de poinçonnage, de mortaisage ou d'élargissement et les résultats obtenus, en traitant de la même façon des pièces étalons.

« Le terme *travail* n'est pas nécessairement employé dans son acception scientifique; il sert à désigner le produit de deux ou trois facteurs, dont l'un est l'effort nécessaire pour poinçonner un trou d'un diamètre déterminé, pour faire une entaille déterminée, ou pour élargir un trou donné à un diamètre donné, le deuxième est le chemin que l'effort fait parcourir à son point d'application pendant l'acte du poinçonnage, du mortaisage ou de l'élargissement.

« Le troisième est le temps pendant lequel s'exerce l'effort nécessaire au poinçonnage, au mortaisage ou à l'élargissement. Pour appliquer la méthode, on emploie souvent une combinaison du premier de ces facteurs avec le second ou le troisième.

« L'expérience acquise jusqu'ici par l'auteur lui a permis de constater que c'est la combinaison de l'effort, avec le chemin parcouru par son point d'application, qui est la manière la plus convenable et la plus exacte de s'en servir.

« Pour mesurer ces facteurs du *travail* accompli, il convient d'en faire des représentations graphiques dans un système de coordonnées, où les ordonnées sont proportionnelles à l'effort en kilogrammes et les abscisses au chemin parcouru par le point d'application de l'effort. Ces procédés de notation sont d'ailleurs connus des ingénieurs, et peuvent se passer de toute description[1]. Il va sans dire que pour ces deux sortes de courbes on peut renverser

1. Dans le cas d'une éprouvette soumise à un essai à la traction, les diagrammes ont les formes telles que $O_1 P_1 B_1$, $O P_2 B_2$, figure 1. Ces diagrammes ont été obtenus avec la série carburée de Terrenoire.

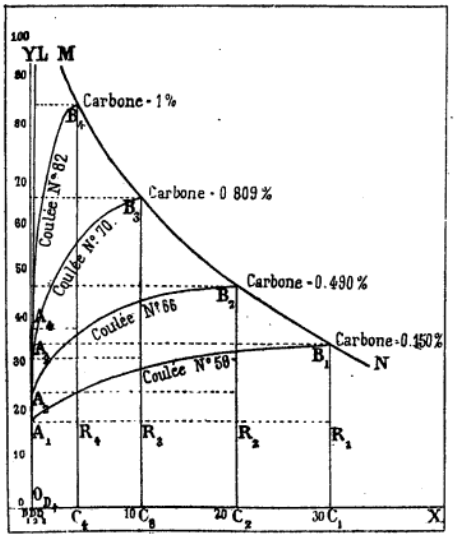


Fig. 1.

Les portions $O A_1$ $O A_2$ sensiblement droites et de même coefficient angulaire, correspondent aux efforts qui amènent le métal à son allongement élastique maximum, les points B_1 B_2 correspondent aux charges de rupture. En

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les coordonnées : les abscisses désigneraient l'effort en kilogrammes, et les ordonnées l'autre facteur du travail.

« Pour tracer ces courbes graphiques on se sert d'un appareil dans lequel une feuille de papier ordinaire est placée sur un cylindre ou un plateau mobile qui est actionné, soit par un mouvement d'horlogerie, ou tout autre dispositif, qui lui imprime un mouvement régulier lorsqu'on prend le temps comme facteur du travail mesuré; soit par un organe quelconque qui se rattache à l'outil et se déplace avec lui lorsque l'espace parcouru par le point d'application de l'effort est l'autre facteur du travail développé.

« Le stylet qui appuie sur le papier et trace la courbe est commandé par un piston à ressort ou un instrument de mesure solidaire avec l'appareil à poinçonner, à entailler ou à élargir; le stylet se déplace donc transversalement au mouvement du papier et parcourt un chemin proportionnel à la pression exercée sur le métal. Ces méthodes d'enregistrement sont connues des ingénieurs et peuvent se passer d'une description plus détaillée.

« Dans cette méthode d'essai, en poinçonnant, en mortaisant ou en élargissant des éprouvettes en acier dur, c'est-à-dire en acier d'une faible ductilité, on aura de très petites courses de l'outil, tout en ayant besoin d'une pression beaucoup plus élevée que celle nécessaire pour obtenir les mêmes courses lorsque les éprouvettes traitées proviennent d'un acier plus doux et plus ductile.

« Si l'on trace des courbes dans lesquelles, comme il a été dit plus haut, les ordonnées représentent l'effort appliqué, et les abscisses le chemin parcouru ou le temps de fonctionnement de l'outil, on verra que, jusqu'à une certaine charge, l'outil produit une entaille beaucoup moindre dans l'acier dur que dans l'acier doux; pour le métal dur la courbe se rapprochera de la ligne des ordonnées plus que pour le métal doux.

« Lorsque l'appareil est disposé de façon à tracer un diagramme fermé, les ordonnées désignant l'effort appliqué et les abscisses, le chemin parcouru ou le temps d'application, les lignes montantes de ces diagrammes se rapprocheront beaucoup plus de la perpendiculaire, et seront bien plus près d'être parallèles lorsque l'acier est moins ductile que lorsque les éprouvettes sont tendres. Enfin, d'une façon générale, l'aire relative à l'acier dur sera plus petite que lorsqu'il s'agit d'éprouvettes tendres.

« La raison en est, qu'avec l'acier plus tendre et plus ductile, le travail de l'outil est plus uniforme, commençant avec l'application d'un effort faible et augmentant successivement à mesure que l'effort augmente, tandis que, avec l'acier plus dur et moins ductile, l'outil produit un effet relativement faible jusqu'à ce que la pression atteigne une grande force, et qu'alors l'outil traverse le métal d'une manière bien plus brusque. »

La figure 2 représente un appareil servant à l'application de cette méthode d'essai. Il consiste en une poinçonneuse hydraulique, composée d'un bâti 2, d'une enclume 3, sur laquelle on pose une éprouvette à poinçonner, du poinçon 4, monté à l'extrémité du piston 9, des soupapes 10, du levier 11 commandant le poinçon et du manomètre I. Le dessin montre la liaison avec l'indicateur de l'appareil que l'on emploie de préférence lorsque le piston est actionné par la vapeur. Le rouleau sur lequel le crayon trace le diagramme est marqué 19.

Les figures 3 et 4 sont des spécimens de courbes obtenues avec des éprouvettes en acier de 1 millimètre d'épaisseur; l'éprouvette C a seule 7 millimètres d'épaisseur. Les courbes ABC sont relatives à de l'acier doux; les courbes D, F, I, se rapportent à des sortes d'aciers plus durs. C est de l'acier basique très doux, d'une résistance à la traction d'environ $32^{kg},2$ par millimètre carré; B a une résistance de 35 kilogrammes; A de 48; D de 54,6; F de 59,5; et I de 52,5. Dans les expériences de la figure 4, le crayon, contrôlé par un ressort, formait des courbes redescendantes, l'éprouvette 5 avait une résistance à la traction de $54^{kg},6$ avec un allongement de 14 % sur 203 millimètres, et l'éprouvette K une résistance de $45^{kg},5$ avec un allongement de 24 %.

En suivant cette méthode, il est facile de faire des essais sur les chutes des pièces laminées avec chaque lingot d'acier entrant dans un lot de fourniture quelconque; ou, si

supposant qu'on opère sur une éprouvette de section droite égale à l'unité, les aires OA_1D_1, OA_2D_2 représentent ce que Poncelet définissait résistance vive d'élasticité, et les aires $OA_1B_1C_1$, $OA_2B_2C_2$ la résistance vive de rupture. Cette dernière grandeur constitue en réalité celle définie par Hunt. (*Note du traducteur, M. Tolmer.*)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

c'est nécessaire, on peut faire les essais sur des chutes provenant de chaque extrémité des tôles ou barres, ou sur des éprouvettes prélevées dans les tôles ou barres mêmes.

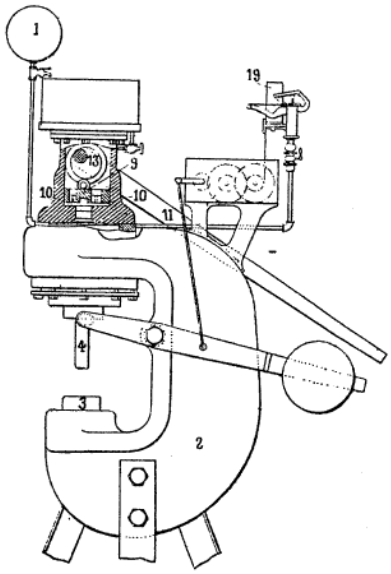


Fig. 2.

Cette facilité de se procurer les éprouvettes et d'effectuer les essais, et l'absence de toute

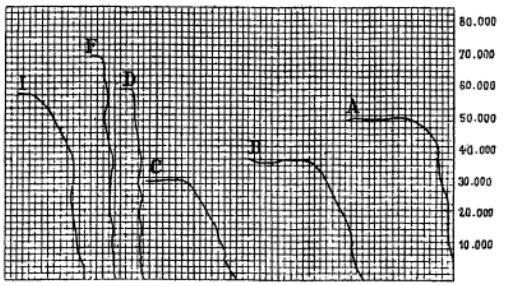


Fig. 3.

grosse dépense spéciale, constituent un avantage considérable de cette méthode d'essai.

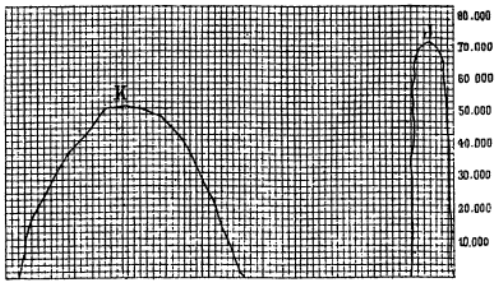


Fig. 4.

D'ailleurs, il est parfaitement possible de munir les poinçonneuses employées dans les ateliers de constructions mécaniques et de chaudronnerie de quelques dispositions permettant de mesurer l'effort ou le travail de poinçonnage; à l'aide d'appareils enregistreurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on peut obtenir un relevé des données caractéristiques relatives à chaque pièce métallique poinçonnée qui entre dans une construction.

On pourra ainsi, pense l'auteur, appliquer un système d'essai plus complet et plus satisfaisant que les méthodes généralement employées.

L'auteur indique, en outre, que l'étude du poinçonnage effectuant le travail dans des conditions analogues à celles de ses observations peut servir dans les spécifications de l'acier convenant aux constructions mécaniques, en appliquant les méthodes graphiques de représentation du travail nécessaire au poinçonnage; on stipulerait, dit-il, que dans certaines conditions définies, le travail accompli, mesuré par la surface des diagrammes obtenus dans des conditions déterminées pour chaque épaisseur donnée, doit avoir une aire minimum en centimètres carrés égale à des chiffres donnés, lorsque la hauteur verticale des figures tracées dans la mesure du travail ne dépasse pas des chiffres donnés.

On voit que M. Hunt veut déterminer la résistance du métal éprouvé, d'après la surface du diagramme de poinçonnage.

Cette méthode conduirait toutefois à des conclusions inexactes, ainsi que l'ont montré les expériences de M. Frémont, car la surface de l'aire ainsi obtenue est affectée par un grand nombre d'éléments autres que la résistance. Les dispositions matérielles de l'expérience, et en particulier la valeur du jeu donné à la matrice, peuvent même la faire varier du simple au double.

C'est donc, ainsi qu'on le verra plus loin, dans l'analyse minutieuse du diagramme, dans la considération isolée de chacun des éléments qu'il comporte, qu'il faut chercher les renseignements nécessaires pour apprécier les propriétés diverses du métal.

L'étude commencée par M. Hunt fut reprise du reste par lui en collaboration avec MM. Condron et B. Johnson; et, en 1894, ces ingénieurs publièrent une note donnant des graphiques de leurs essais, et durent conclure par l'aveu de leur insuccès, « car, dirent-ils, ils ne purent trouver aucune loi donnant le rapport de la traction au poinçonnage ».

Préoccupés de la considération trop exclusive de l'aire du diagramme, ils n'eurent pas l'idée d'y chercher les éléments susceptibles de leur donner d'autres indications, comme celle de la ductibilité ou de la fragilité. Il faut observer du reste que les diagrammes obtenus en relevant simplement les pressions transmises par le piston hydraulique actionnant le poinçon ne donnent pas une idée exacte du phénomène, ils présentent en général dans le tracé une pointe très accentuée, semblant indiquer que la pression développée monte rapidement pour atteindre sa valeur maximum et qu'elle redescend presque aussi rapidement, tandis que cette forme angulaire des diagrammes ne se retrouve pas lorsqu'on opère directement sur l'outil de la machine.

L'expérience montre d'ailleurs qu'elle n'est pas conforme à la vérité des faits; il suffit, en effet, de poinçonner avec des machines fonctionnant à la main pour s'assurer que l'effort maximum n'est pas instantané, mais présente au contraire une certaine durée.

Cette forme angulaire résulte probablement d'un effet de lancé sur les ressorts de l'appareil manométrique, lequel détermine ainsi un effet de compression instantané qui fausse le diagramme.

En dehors des recherches ainsi effectuées à l'étranger, divers expérimentateurs avaient aussi étudié en France la question de la détermination de l'effort développé dans le poinçonnage.

C'est ainsi que l'éminent ingénieur de constructions navales, M. Berrier-Fontaine, mesura cet effort en relevant des diagrammes, pendant le fonctionnement, sur diverses machines hydrauliques installées dans l'arsenal de Toulon, et ses recherches constituent même le premier travail d'observations expérimentales sur cette question.

Ces observations furent résumées dans une note dont il a bien voulu donner lecture, le 12 juin 1878, devant le Congrès des Ingénieurs tenu à Paris à l'occasion de l'Exposition Universelle, et nous en reproduisons quelques extraits.

Page 31. — « L'indicateur qui a servi à obtenir les courbes est un indicateur Richards, modifié de manière à le mettre en état de mesurer avec ses ressorts ordinaires des pressions pouvant atteindre 150 à 200 kilogrammes par centimètre carré (2250 à 3000 livres par pouce carré); il a suffi, pour obtenir ce résultat, de remplacer le cylindre à vapeur de l'indicateur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et son piston par un cylindre d'une section beaucoup plus faible et par un petit piston hydraulique avec garniture emboutie en peau de daim; le rapport de la section du nouveau cylindre à celle de l'ancien étant connu, il est facile d'en déduire l'échelle des pressions correspondant à chacun des ressorts de l'appareil. »

Page 37. — « Ces diagrammes, relevés en très grand nombre sur les diverses machines-outils, riveuses, cisailles, poinçonneuses, etc., n'ont pas été calculés complètement ni étudiés, dit M. Berrier-Fontaine, avec toute l'attention qu'ils méritent, car cet ingénieur, absorbé par ses importants travaux, a manqué du temps matériel nécessaire. »

Voici textuellement le passage relatif au travail de poinçonnage et de cisaillement :

Page 33. — « Lorsque le poinçon arrive au contact de la tôle, son mouvement est à peu près arrêté, et la pression s'élève jusqu'à ce qu'elle ait atteint sa limite nécessaire pour cisailler la tôle sur le pourtour de l'outil; cela fait, la pression redescend presque aussi rapidement qu'elle était montée, l'outil n'ayant pas d'autre effort à faire que de pousser la débouchure hors du trou.

« Pour la machine à poinçonner, la pression maximum indiquée par la courbe ne correspond pas à la pression constante des accumulateurs, mais seulement à celle qui est nécessaire pour effectuer le travail que l'on demande à la machine. Le travail moteur dépensé étant d'ailleurs toujours mesuré par la dépense du volume d'eau sous pression égal à la section du piston que conduit l'outil, multiplié par la course de ce dernier, on voit que dans ce cas le rapport du travail utile obtenu au travail moteur dépensé peut être très faible, et d'autant plus faible que le travail utile demandé à la machine est plus au-dessous du travail maximum qu'elle est capable d'exécuter. »

Page 34. — « Les courbes de la machine à cisailler les cornières sont à peu près semblables à celles de la machine à poinçonner; cette similitude s'explique par la disposition des lames de nos machines à cisailler les cornières, dans lesquelles les deux arêtes de la lame sont à peu près parallèles aux arêtes correspondantes de la contre-lame, d'où il résulte que la cornière est cisaillée d'un seul coup sur toute la section à la fois. »

« Sur les courbes de la machine à cisailler les tôles dans laquelle la lame a une certaine inclinaison sur la contre-lame, on reconnaît un autre caractère. »

Sans parler de la partie correspondante à la portion inutile de la course, ces courbes présentent au moins deux autres parties bien distinctes : la première correspond à la période du travail dans lequel l'effort exercé par l'outil s'accroît de plus en plus, à mesure que la section attaquée devient de plus en plus grande, la seconde, qui indique une pression constante, représente la période pendant laquelle la section attaquée reste constante de son côté. Cette partie de la courbe est la dernière dans le cas où la largeur de la tôle est assez grande pour que le coup de cisaille représenté par la courbe ne soit pas suffisant pour la couper complètement; si, au contraire, la tôle est assez étroite pour qu'un seul coup de cisaille suffise à la couper sur toute sa largeur, la courbe correspondante se termine par une troisième partie dans laquelle la pression décroît progressivement à mesure que la section attaquée devient de plus en plus réduite.

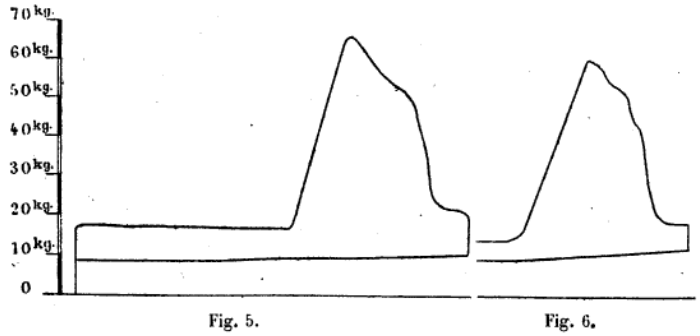


Fig. 5. Fig. 6.

Les figures 5, 6, 7 et 8 reproduisent les vues des diagrammes obtenus par M. Berrier-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fontaine ; les figures 5 et 6 sont des diagrammes de poinçonnage et les figures 7 et 8 des diagrammes de cisaillement par lames obliques.

On voit que les diagrammes obtenus par M. Berrier-Fontaine présentent, comme ceux de M. Hunt, cette forme angulaire signalée plus haut et qui tient sans doute au lancé du ressort.

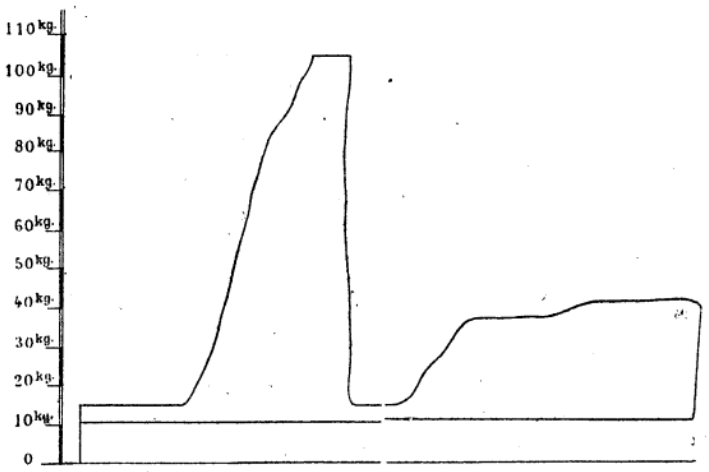


Fig. 7. Fig. 8.

Il faut observer du reste que l'important travail de M. Berrier-Fontaine a été effectué principalement dans le but de montrer l'économie réalisée par l'emploi de la pression hydraulique, et, tout en s'attachant à relever de nombreux diagrammes, l'auteur n'a jamais songé à faire une étude spéciale du poinçonnage et du cisaillement, ainsi qu'il a bien voulu nous le déclarer, du reste, avec une réserve qui l'honore.

Plus tard, un ingénieur des ateliers du chemin de fer de l'Est, M. Tolmer, entreprit de son côté des expériences, dont il donna le compte rendu dans un intéressant article publié dans la *Revue générale des Chemins de fer*, N° de septembre 1894. M. Tolmer remarque aussi que la précision de l'essai à la traction n'est qu'apparente, car les résultats donnés par les diverses éprouvettes découpées dans une même pièce présentent souvent des écarts notables; en outre, la méthode est longue et coûteuse; enfin, dernier inconvénient bien grave, certains aciers donnent aux essais de traction des résultats conformes aux exigences des spécifications les plus sévères, et néanmoins n'offrent aucune sécurité à l'emploi.

« On comprend, ajoute M. Tolmer, l'intérêt qu'offrent des méthodes d'essai plus simples facilement applicables à toutes les parties d'une construction métallique, et d'un résultat plus certain. Parmi ceux qui satisfont plus ou moins à ces conditions, les essais au choc et au poinçonnage paraissent offrir de sérieux avantages. M. Tolmer s'est donc attaché de son côté à l'étude du poinçonnage, et il a cherché, dit-il, à déterminer expérimentalement la variation de la pression à produire pour provoquer l'enfoncement progressif d'un poinçon dans une tôle de fer. »

DESCRIPTION DE L'APPAREIL

« A cet effet, nous nous sommes servi, dit-il, de la presse hydraulique employée ordinairement au calage et au décalage des roues sur les essieux.

« Cette machine peut développer des efforts variant de 0 à 220 tonnes, efforts qui sont évalués au moyen d'un manomètre métallique A bien gradué (fig. 9). Le poinçon B étant monté sur le plongeur et la matrice C sur le bâti fixe.

« Le déplacement du plongeur était indiqué par l'aiguille D se mouvant derrière une règle E recouverte d'une feuille de papier.

« L'aiguille D était fixée à un poids suspendu à un fil enroulé sur une poulie en bois P.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Une autre poulie p, de rayon dix fois moindre et calée sur le même axe, était reliée par une ficelle à fouet à un crochet G fixé sur le plongeur. »

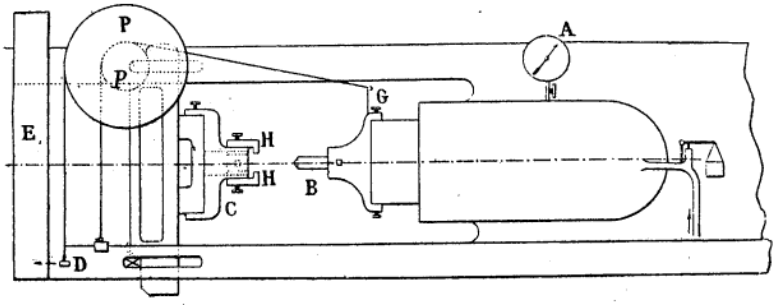


Fig. 9.

MARCHE DES EXPÉRIENCES

« Un morceau de tôle étant placé contre la matrice, sous les griffes de dégagement HH, un opérateur embraye la pompe de compression, à petite ou à grande vitesse, et lit à haute voix les indications du manomètre de 5 en 5 atmosphères, ainsi que le maximum de pression auquel on est arrivé.

« Un autre expérimentateur, placé en face de la règle E, suit avec un crayon les mouvements de l'aiguille D et pointe sur la bande de papier les nombres dictés par son collaborateur.

« Chaque expérience fournit :

« 1° Une bande de papier donnant des indications reproduites sur la figure 10.

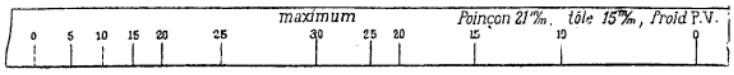


Fig. 10.

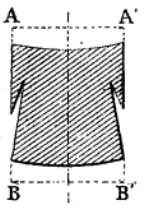


Fig. 11.

« 2° Une débouchure sur laquelle on mesure les dimensions principales et dont on note la forme générale (fig. 11). »

TRANSCRIPTION DES EXPÉRIENCES

« Les causes d'erreurs de semblables expériences sont assez nombreuses :

« 1° Les erreurs personnelles provenant du temps qui s'écoule entre l'instant précis où une indication est perçue par le premier opérateur sur le manomètre et celui où le deuxième la note sur la bande de papier;

« 2° Les erreurs de lecture provenant soit de l'inexacte appréciation de l'aiguille, soit des mouvements saccadés qui se produisent pendant son déplacement sur le cadran;

« Les erreurs de traçage provenant du déplacement par saccades du piston à chaque coup de pompe, déplacement qui influe naturellement sur les mouvements de l'indicateur.

« Les erreurs personnelles affectent toutes les indications sur la bande de papier dans le même sens; elles sont d'ailleurs très faibles et peuvent être négligées.

« Les autres erreurs sont plus sensibles, surtout dans le cas de faibles épaisseurs à poinçonner, elles peuvent atteindre une ou deux tonnes pour les lectures et une tonne pour les tracés, mais elles ont ceci de particulier qu'elles affectent indifféremment les résultats par excès ou par défaut. Pour tirer le meilleur résultat possible de cette particularité, nous avons employé pour la transcription des expériences une méthode analogue à celle employée pour juger du résultat d'un tir.

« Sur un axe, oy, nous avons porté des longueurs proportionnelles aux pressions lues

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur le manomètre et sur l'axe *ox* des longueurs proportionnelles aux déplacements du poinçon (fig. 12, 13 et 14).

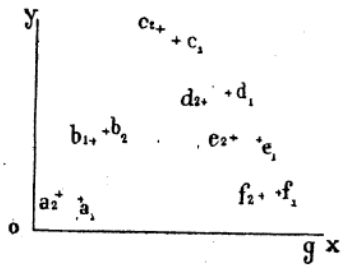


Fig. 12.

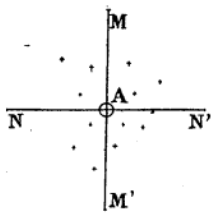


Fig. 13.

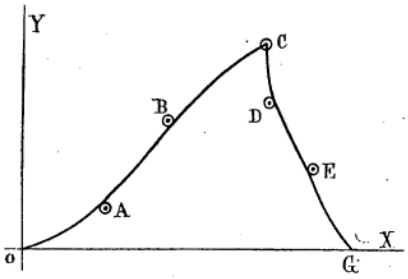


Fig. 14.

« Une première expérience nous donnait les points *o*, *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* et *g*.

« Le même poinçon agissant une seconde fois sur la même tôle, donnait les points *o*, a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2, *g*.

« En effectuant une dizaine de ces expériences on groupait dans le voisinage l'un de l'autre de tels points que o_1, a_2, b_1, b_2, etc.

« Traçons deux lignes rectangulaires MM' et NN' (fig. 13), à travers ces groupes de telle sorte qu'un même nombre de points se trouve de part et d'autre de chacune d'elles. Le point de rencontre A, généralement assez bien indiqué, de ces deux lignes est le point adopté.

« On obtient finalement une série de points A, B, C, D, E, que l'on joint aussi exactement que possible par une courbe continue, sauf au point minimum C où généralement on a eu à constater une chute brusque de la pression, correspondant probablement à l'arrachement du métal (fig. 14). »

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

« Les expériences ont été effectuées avec des poinçons ayant pour diamètre 8, 11, 13, 16, 19, 21, 31, 41 et 72 millimètres agissant respectivement sur des tôles variant de 1 à 30 millimètres d'épaisseur.

« Le déplacement des poinçons a été effectué avec les deux vitesses que peut donner la machine, soit 97 millimètres et 46 millimètres à la minute.

« Les tôles ont été poinçonnées à froid et quelquefois à chaud, au rouge cerise. »

INFLUENCE DE LA VITESSE

« La vitesse variant du simple au double, on a obtenu identiquement les mêmes courbes et les mêmes débouchures, toutes les autres conditions étant identiques. »

POINÇONNAGE A CHAUD

« Les résultats fournis par le poinçonnage à chaud sont très divers et permettent difficilement de déduire une loi exacte. Les courbes des pressions affectent la forme OAB (fig. 15).

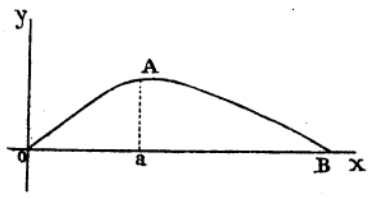


Fig. 15.

« La valeur maximum de l'effort à produire varie entre le septième et le dixième de l'effort nécessaire à froid. »

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

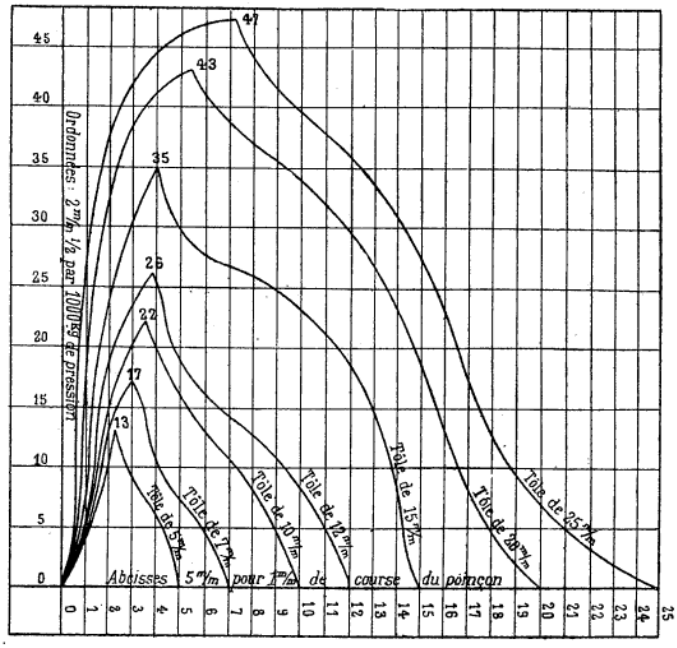


Fig. 16.

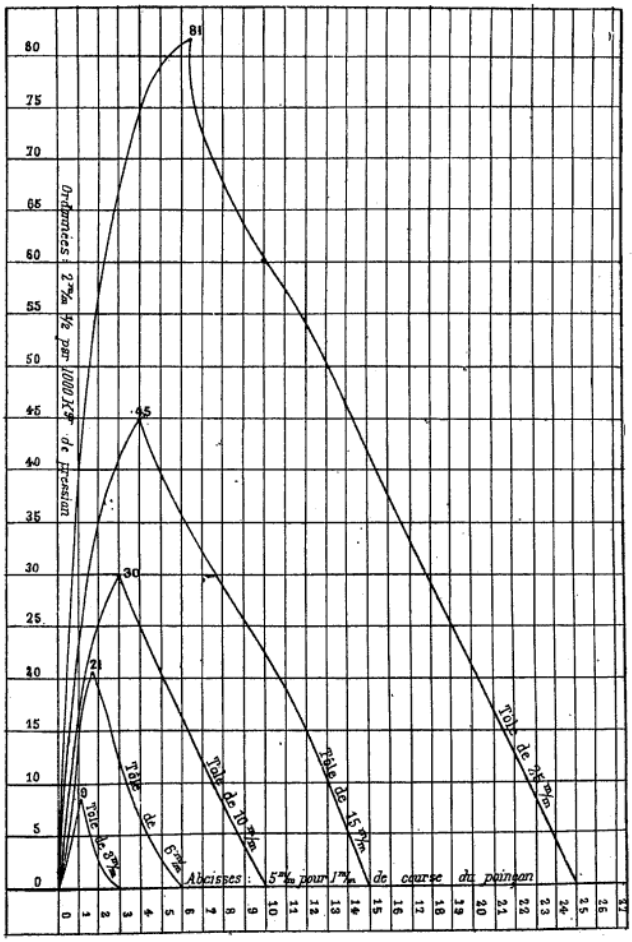


Fig. 17.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

POINÇONNAGE A FROID

« Les figures 16 et 17 donnent à des échelles diverses les diagrammes obtenus dans les expériences de poinçonnage à froid. La variation des efforts avec le degré d'enfoncement du poinçon se produit dans des circonstances très variables et qui se prêtent difficilement à l'énonciation d'une loi même approximative.

« La forme la plus générale du diagramme est celle de la figure 18, elle correspond à la forme des débouchures (fig. 19). On peut diviser ce diagramme en quatre parties.

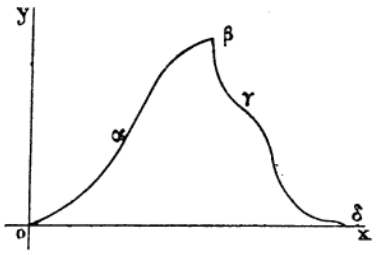


Fig. 18.

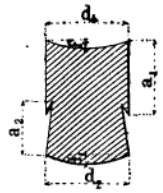


Fig. 19.

« I. La partie Oα de la courbe, tournant sa concavité vers l'axe des y positifs, correspond au déplacement du poinçon qui produit la flexion de la tôle dans la matrice avant l'écoulement puis l'arrachement du métal.

« Cette portion de la courbe est d'autant plus importante et sa concavité d'autant plus grande que l'épaisseur E de la tôle est plus faible par rapport au diamètre D du poinçon et que l'élasticité du métal est plus grande enfin que le jeu du poinçon dans la matrice est plus grand.

« II. La partie αβ qui tourne sa concavité vers l'axe des y négatifs correspond aux déplacements du poinçon qui produisent l'écoulement puis l'arrachement du métal.

« La concavité de cette portion de courbe est d'autant plus grande que le métal est plus mou, et son épaisseur e plus grande par rapport au diamètre D du poinçon.

« III. La portion βγ indique une chute brusque de pression qui suit le moment où la débouchure se sépare du trou.

« La partie γδ correspond à la série des efforts nécessaires pour expulser la débouchure de son logement.

« Dans le cas des tôles minces, la région βδ peut devenir très importante et se substituer presque complètement à la région γδ (fig. 20).

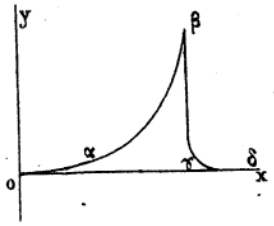


Fig. 20.

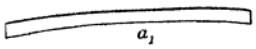


Fig. 21.

« Dans les débouchures, la partie de hauteur α_1 subsiste seule et α_2 disparaît comme le montre la figure 21.

« Dans le cas des tôles relativement épaisses, sur lesquelles agissent les poinçons de faible diamètre (ou mieux lorsque le rapport $\frac{D}{e}$ atteint l'unité ou lui devient supérieur) c'est au contraire la région βγ qui disparaît pendant que la partie de débouchure de hauteur α_2 se substitue presque complètement à celle de hauteur α_1. Dans ce dernier cas la courbe paraît dépourvue de discontinuité, pour présenter un maximum en β, ainsi que cela a lieu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avec le poinçonnage des trous de 16 millimètres dans des tôles de moins de 12 millimètres à chaud.

« Ce fait se produit à froid avec des poinçons de 8 millimètres dans des tôles de 7 millimètres (fig. 22), tandis que par contre le poinçonnage d'un trou de 72 dans la tôle de fer de 1 millimètre donne une courbe (fig. 20), où manquent précisément les régions qui se trouvent dans la figure 23.

Fig. 22.

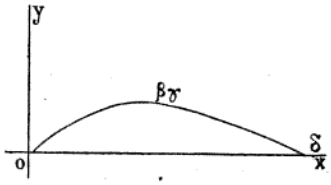


Fig. 23.

« Le poinçonnage des trous de 16 millimètres dans des tôles dont les épaisseurs varient de 2 à 20 millimètres montre assez bien les transformations successives qu'éprouvent les courbes.

« En terminant, M. Tolmer déclare ainsi que, dans l'état actuel de nos connaissances, il ne saurait être question de déduire des résultats ainsi obtenus les valeurs caractéristiques des propriétés des métaux : résistance à la rupture par traction, limite élastique, allongement, résistance au poinçonnage, etc.... »

On remarquera que les diagrammes obtenus par M. Tolmer présentent aussi cette forme angulaire qui paraît résulter d'après M. Frémont d'une imperfection dans le fonctionnement des appareils employés. En dehors des causes d'erreur inhérentes à cette méthode et que l'auteur reconnaît lui-même, il faut ajouter que le procédé présente en outre cet inconvénient d'exiger l'emploi d'une machine hydraulique, ce qui en restreint nécessairement l'usage courant comme méthode d'essai.

L'élasticimètre, imaginé par M. Frémont dans les expériences si remarquables effectuées par lui en 1894, constitue au contraire un appareil particulièrement simple qui pourra être appliqué sans difficulté sur tous les types de machines.

Cet appareil utilise l'élasticité même du bâti de la machine qui poinçonne ou cisaille pour enregistrer en ordonnées les efforts exercés sur l'outil, et en abscisses la course amplifiée de ce même outil.

Dans sa disposition initiale, cet appareil se compose de deux branches (fig. 24) : l'une

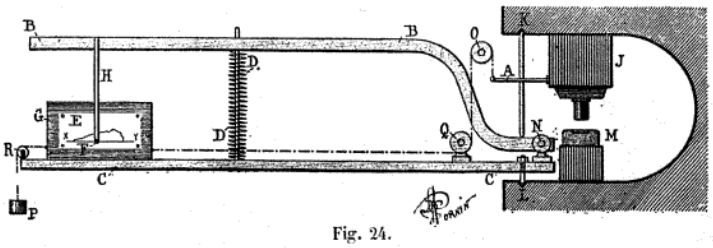


Fig. 24.

droite C, et l'autre B courbée à une extrémité pour venir s'articuler en N sur la première, comme un compas, dont la tête serait déportée; un ressort antagoniste D tend à écarter ces deux branches, qui sont en contact avec le bâti; la branche C étant fixe, c'est la branche B qui s'écarte et entraîne le crayon F par l'intermédiaire de la tige H.

Le crayon trace verticalement une ordonnée proportionnelle à l'effort développé par la machine. Mais la planchette G de l'enregistreur est entraînée horizontalement par un fil, qui, passant sur les poulies Q et O, est attaché à une touche A, suivant le mouvement du porte-outil J.

La poulie Q est différentielle pour amplifier la course.

Les abscisses tracées sur le papier par le crayon F sont donc proportionnelles à la course de l'outil, et la courbe enregistrée représente très exactement le travail nécessaire pour l'opération exécutée, sans intermédiaire hydraulique ou autre, faussant le résultat.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La ligne des abscisses représente la course de l'outil; cette course est de 33 millimètres. Le diagramme se lit de droite à gauche.

L'usage de l'appareil ainsi disposé a révélé toutefois certaines défectuosités de construction.

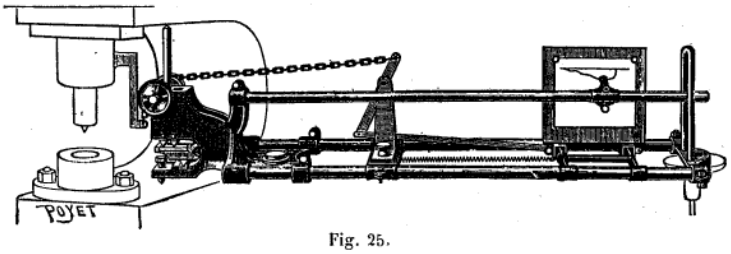


Fig. 25.

M. Frémont a construit un autre appareil perfectionné (fig. 25) présentant les modifications suivantes :

1° Le bras de levier enregistreur est monté sur couteaux, il agit par son propre poids.

2° L'amplification peut être doublée pour des essais plus délicats ou pour de plus faibles efforts à enregistrer.

3° Le diagramme peut être tracé de gauche à droite à l'aide de quelques artifices dans la disposition des organes.

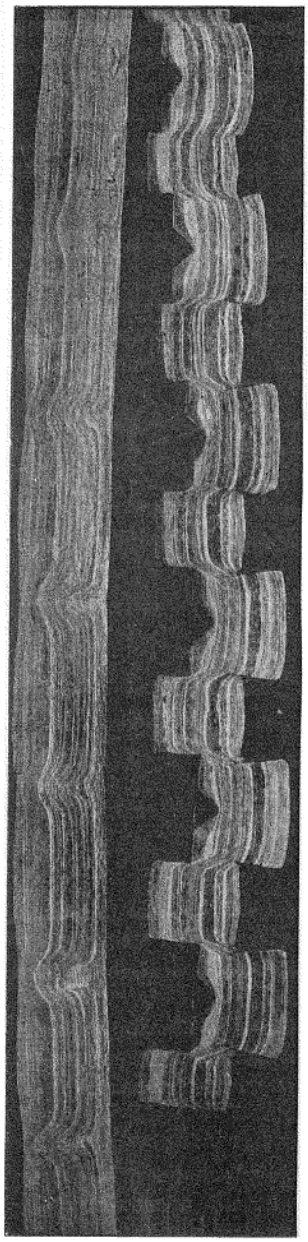


Fig. 26. — Section d'un morceau de fer montrant les phénomènes successifs du poinçonnage.

L'élasticimètre ainsi constitué a permis à M. Frémont d'effectuer, sur le cisaillement et le poinçonnage, ces belles recherches grâce auxquelles il est arrivé à donner l'interprétation complète de ces phénomènes avec un esprit de méthode, d'investigation persistante et sagace qu'on ne saurait trop admirer.

L'auteur s'est attaché, en effet, à ne laisser dans l'ombre aucun des points du phénomène qu'il étudiait, de manière à soumettre ainsi au contrôle des faits et jusque dans les moindres détails l'explication théorique qu'il en donnait. Cette théorie est résumée dans un mémoire publié au *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils* (n° de janvier 1896); elle est exposée plus complètement, ainsi que les recherches ultérieures qu'a poursuivies M. Frémont avec l'appui de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, dans le *Bulletin* de cette Société (voir n° de septembre 1897).

Nous la résumons dans le passage suivant, qui est extrait du mémoire de M. Frémont.

« Dans l'axe d'un morceau de fer misé de $0^m,100$ de largeur sur $0^m,020$ d'épaisseur, j'ai donné, dit-il, sept coups successifs avec le même poinçon, mais de telle sorte que le premier coup de poinçon n'entamât que peu le métal, et les suivants chacun un peu plus que le précédent, jusqu'au septième, où la perforation fut complète. Puis, coupant la barre longitudinale par le milieu de ces trous, j'ai poli et damasquiné la surface tranchée pour faire apparaître la disposition des mises, telle qu'elle est représentée par la figure 26.

« J'ai pu constater, tout d'abord, que le phénomène du poinçonnage est un travail de traction et non pas de glissement,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

« Chaque couche comprimée sous le poinçon ne se sépare pas immédiatement de la couche dont elle provient, elle ne glisse pas, mais elle reste attachée par un ligament qui va s'allongeant sous l'effort du poinçonnage. J'ai appelé ce ligament *éprouvette*, par analogie avec les pièces préparées pour subir les essais, notamment ceux de traction.

« Ces éprouvettes ont des longueurs différentes, suivant les couches auxquelles elles appartiennent, et elles atteignent leur longueur maximum au milieu de l'épaisseur.

« Cette augmentation doit être attribuée à ce fait que les couches intéressées dans l'effort du poinçonnage se contournent concentriquement avec des rayons graduellement croissants depuis les bords jusqu'au milieu de l'épaisseur, et non pas parallèlement avec des rayons égaux dans toute l'étendue de l'épaisseur, comme le supposait la théorie émise antérieurement par M. Tresca.

« La figure 27 est le schéma de ce phénomène, les losanges ABCDEF et GHIJKL, constitués en suivant les points extrêmes affectés par les déformations dues au poinçonnage, limitent par là même, en chaque point, les diverses longueurs des éprouvettes correspondantes.

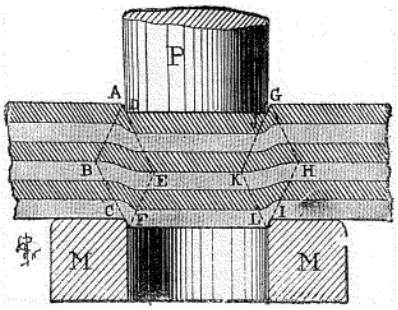


Fig. 27.

« Partant de là, nous considérons que le poinçonnage d'un métal va consister à opérer l'allongement de ces éprouvettes jusqu'à en provoquer la rupture.

« Après que le téton du poinçon a marqué son empreinte sur la surface de faible étendue qu'il représente, l'effort développé s'exerce sur la surface entière de l'outil qui vient presser le métal, et il doit évidemment s'augmenter tout d'abord d'une façon très sensible pour vaincre une résistance qui intéresse une zone agrandie.

« Cette première période du poinçonnage doit être considérée comme élastique, car si alors la pression cesse son action, on ne constate aucune déformation permanente. Dès que le métal est comprimé plus fortement entre le poinçon et la contre-matrice, une légère empreinte des deux outils apparaît sur le métal, la première déformation se distingue nettement.

« Du côté du poinçon, le métal a été entraîné; il s'est formé tout autour une zone de dépression A (fig. 28) et, du côté de la matrice, la proue de la débouchure apparaît, le contour est déprimé en B comme en A.

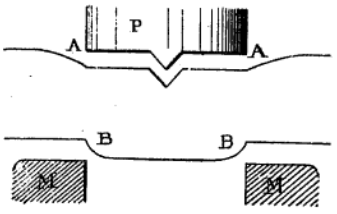


Fig. 28.

« Plus le métal possède de ductilité, plus ces dépressions sont sensibles; elles mesurent donc, en quelque sorte, cette propriété.

« Les deux éprouvettes en contact, l'une avec l'arête du poinçon, l'autre avec l'arête de la matrice, sont de toutes les plus courtes, leur allongement sera donc moindre que celui des suivantes; elles se rompent les premières.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

« Voyons comment se feront les ruptures des éprouvettes.

« Chacune est conique, présentant une section variable, et elle ne peut pas offrir, par suite, la même résistance totale sur toute la longueur; si l'on considère, en effet, une partie de cette éprouvette, en KH par exemple (fig. 29), l'on constate qu'à épaisseur égale la section TK est plus faible que la section SH.

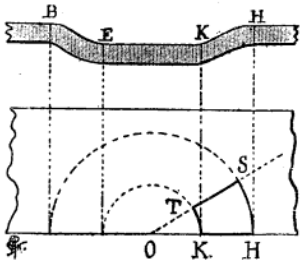


Fig. 29.

« La striction et la rupture se produisent toujours dans la partie la plus faible de l'éprouvette; il en résulte que c'est en DEFJKL (fig. 27) que se déclarera la rupture; la débouchure prendra ainsi la forme d'un double tronc de cône ayant sa petite base commune au milieu de l'épaisseur.

« Mais l'effet de la compression du poinçon sur la débouchure interviendra sur les premières mises et renforcera la partie faible des éprouvettes du haut en leur donnant un excès de résistance par le frottement qu'exerce l'outil; celles-ci seront donc rompues suivant la génératrice du poinçon, c'est-à-dire suivant un cylindre, pendant que les éprouvettes situées du côté de la matrice se séparent, au contraire, suivant le tracé théorique de forme conique.

« Les déchirures ainsi commencées continuent à se propager à mesure que le poinçon pénètre plus profondément dans le métal.

« Du côté de la matrice, la ligne inclinée qui constitue la génératrice du cône de séparation s'allonge jusqu'au milieu de l'épaisseur, donnant ainsi au bas de la débouchure cette forme étranglée qui la caractérise.

« Cette forme ne se retrouve pas, au contraire, aussi prononcée dans le haut de la débouchure du côté du poinçon, car cet outil intervient alors en développant une pression et un frottement qui exaltent la résistance des éprouvettes élémentaires dans les points de faible section, où la déchirure se produirait autrement, comme c'est le cas dans la partie inférieure.

« La rupture se trouve ainsi reportée vers la limite de cette zone d'action directe de frottement du poinçon, et l'outil opère, en réalité, une sorte de cisaillement, qui tranche la paroi du trou suivant une ligne faiblement inclinée vers l'intérieur et tendant à se rapprocher de la verticale. Cet effet se continue tant que le poinçon rencontre dans sa marche un ligament encore adhérent à la paroi extérieure, et il s'arrête évidemment lorsque la ligne verticale de cette paroi se trouve interrompue par la fente inclinée déjà produite sur la partie inférieure, ainsi qu'il a été indiqué.

« Comme cette fente s'est prolongée jusqu'au milieu en s'inclinant continuellement à l'intérieur de la débouchure, il en résulte qu'elle s'est élevée au-dessus du point où elle est rencontrée par cette ligne verticale, et que, par suite, elle a déjà détaché de la débouchure l'extrémité intérieure des ligaments du milieu, en raison de l'inclinaison qu'ils prennent en s'allongeant. Ces ligaments, qui devraient rester adhérents à la paroi extérieure, si la forme théorique était conservée, se trouvent, au contraire, détachés de celle-ci suivant une ligne verticale, par l'action du poinçon, et ils viennent retomber autour du milieu étranglé de la débouchure, en lui formant ainsi une collerette de bavures qui complète son aspect caractéristique.

« On voit, dès lors, l'explication de cette forme constamment dirigée vers le bas qu'on retrouve dans toutes les débouchures, et qui nous a servi de point de départ pour montrer l'inexactitude de la théorie d'après laquelle le poinçonnage opérerait une simple action de glissement avec déplacement parallèle de couches superposées. »

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dès son apparition, cette théorie a excité l'attention et l'intérêt des ingénieurs compétents, ainsi que des corps savants.

On peut dire, en effet, que la théorie formulée par M. Frémont éclaire d'un jour tout nouveau le mécanisme du poinçonnage, et, jusqu'à plus ample informé, elle paraît répondre à toutes les objections.

Grâce au résultat ainsi acquis, il devenait possible de reprendre la question de l'étude théorique du diagramme du poinçonnage avec quelques chances de succès, d'y retrouver l'indication des propriétés du métal d'une façon plus complète et précise qu'on n'avait pu le faire auparavant et peut-être d'apporter ainsi le moyen vainement cherché d'utiliser le poinçonnage comme méthode d'essai.

Les extraits que nous venons de reproduire des travaux, d'ailleurs si intéressants, des premiers observateurs montrent, en effet, qu'ils n'avaient jamais en vue que la détermination de l'effort maximum développé; ils n'avaient même pas réussi à le dégager d'une façon complètement satisfaisante.

En outre, ils n'avaient pu songer à rechercher dans l'examen d'un diagramme insuffisant l'indication des autres propriétés caractéristiques du métal.

MM. Frémont et Baclé ont entrepris cette étude en s'attachant à analyser soigneusement les divers éléments du diagramme de manière à pouvoir définir l'interprétation à donner de chacun d'eux.

Ainsi que l'indiquent les auteurs dans la communication soumise par eux à l'Académie des Sciences le 18 novembre 1895, ils ont opéré sur des métaux de nuances de dureté aussi différentes que possible, représentant toute l'étendue de l'échelle des résistances, depuis le cuivre rouge cédant à un effort de 20 kilogrammes par millimètre carré jusqu'à l'acier dur supportant sans rupture une charge de 95 kilogrammes.

« En étudiant un échantillon de chacune de ces nuances nous avons toujours obtenu, disent-ils, un diagramme bien déterminé et qui s'est constamment reproduit avec une fidélité invariable lorsque nous avons renouvelé l'expérience en des points divers de la même barre, ou même en opérant sur des machines-outils différentes.

« Nous sommes donc fondés à penser que ce diagramme doit être considéré comme caractérisant bien la nuance étudiée et comme possédant, par conséquent, des éléments qui permettent de définir la résistance qu'elle présente.

« Or, ces éléments ne peuvent pas être cherchés, comme on l'a pensé autrefois, dans le relevé pur et simple de la surface du diagramme donnant cependant la valeur du travail dépensé; car, pour le poinçonnage, par exemple, ce diagramme renferme une partie correspondant au travail d'expulsion de la débouchure, qui est indépendante, par conséquent, de l'opération proprement dite et qu'on ne peut pas cependant distraire avec exactitude.

« Nous avons observé, au contraire, que l'ordonnée maximum du diagramme fournit une indication rigoureusement proportionnelle à la valeur de l'effort développé, ce qui se comprend d'ailleurs immédiatement, puisqu'elle enregistre la déformation élastique qu'a subie le col de cygne de la machine employée, poinçonneuse ou cisaille, pour fournir cet effort.

« Nous avons pu montrer, en effet, que tout d'abord l'ordonnée obtenue est bien proportionnelle à l'épaisseur de la section à trancher, comme c'est le cas pour l'effort lui-même; nous avons fait raboter, à cet effet, les barres étudiées pour obtenir à la fois les

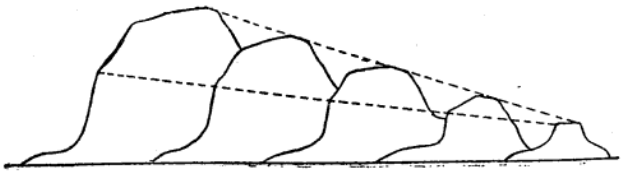


Fig. 30.

épaisseurs de 5 millimètres, 10 millimètres, 15 millimètres, 20 millimètres, 25 millimètres; puis, nous avons effectué les expériences de poinçonnage et de cisaillement sur les différentes barres pour chacune de ces épaisseurs. Le diagramme a donné chaque fois une ordonnée proportionnelle à celle-ci, comme on peut le voir sur la figure 30 qui représente,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à titre d'exemple, les diagrammes obtenus sur une même barre en métal demi-dur, rabotée aux diverses épaisseurs indiquées (voir aussi le tableau II ci-contre).

« Si, pour une même épaisseur donnée, nous comparons maintenant les diagrammes obtenus sur l'ensemble des barres préparées, comme il a été indiqué, avec les métaux de nuances et de dureté différentes, nous pouvons constater que l'ordonnée maximum correspondant à chacune de ces barres est toujours bien proportionnelle à la charge de rupture déterminée d'autre part au moyen de l'essai de traction habituel.

« Nous avons même pu vérifier ce fait en mesurant numériquement dans certaines expériences de poinçonnage l'effort développé par la machine employée et en le rapprochant de la charge de rupture à l'essai à la traction, et nous avons pu constater entre les deux un rapport qui se maintient sensiblement constant pour toutes les nuances de dureté considérées et qui est toujours voisin de 0,70, la charge de rupture par poinçonnage atteignant ainsi les sept dixièmes de la rupture par traction calculée pour une surface égale à celle de la section tranchée.

« Il nous paraît donc établi par ces expériences que l'ordonnée maximum du diagramme de poinçonnage fournit sur la résistance du métal un renseignement aussi précis que pourrait le donner l'essai à la traction.

« La figure 31 représente le type du diagramme de poinçonnage.

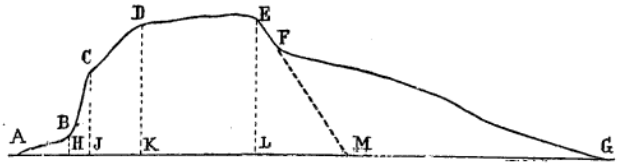


Fig. 31.

« Dans ce diagramme, la dureté du métal est accusée par l'inclinaison initiale de la courbe à l'origine de l'effort : le tracé s'élève, en effet, d'une façon d'autant plus brusque et en se rapprochant mieux de la verticale, que le métal présente plus de raideur; plus loin dans la partie CD, les valeurs simultanées que prennent l'ordonnée et l'abscisse à la suite de cette période préliminaire, au moment où se produit le changement d'inclinaison, fournissent par leur concours une indication précise de la malléabilité du métal et définissent, en un certain sens, la période élastique de l'opération étudiée, car elles figurent exactement les déformations qu'il est susceptible d'éprouver ainsi que l'intensité de l'effort qui les provoque avant l'apparition des déchirures élémentaires.

« Si l'on considère ensuite la région de la courbe DE qui s'étend jusqu'à l'ordonnée maximum correspondant à l'effort de rupture totale, on y voit la représentation de cette période de déchirures élémentaires qui, dans le diagramme de traction, apparaît aussitôt que la limite élastique est dépassée.

« L'allongement qu'éprouve le métal au cours de cette période est figuré par l'écartement des deux ordonnées DK et EL qui la limitent, le métal étant évidemment d'autant plus ductile que cet écartement représente une proportion plus élevée de l'épaisseur totale de la section tranchée.

« Dans cette partie du diagramme, les métaux les plus ductiles donnent toujours une abscisse supérieure à celle des métaux durs; l'allongement dans le poinçonnage fournit donc à cet égard une donnée aussi précise que l'allongement dans la traction.

« La même observation s'applique encore à la mesure de la striction qui se retrouve aussi dans le diagramme de poinçonnage, à condition de prolonger jusqu'à la ligne des abscisses la tangente à la courbe menée au point sommet de l'ordonnée maximum, de façon à distraire toute la partie située au delà de cette tangente, laquelle correspond seulement au travail d'expulsion de la débouchure.

« Le triangle LEM, ainsi déterminé entre l'ordonnée maximum EL et la ligne des abscisses, varie avec la striction et s'accroît en même temps qu'elle; il peut donc en fournir

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU II

Étude du poinçonnage et du cisaillement comme méthodes d'essai.

ESSAIS COMPARATIFS EFFECTUÉS PAR MM. FRÉMONT ET BACLÉ

Ordonnées maxima relevées dans les expériences effectuées sur des barres d'épaisseurs croissantes et de diverses natures de métal, pour le poinçonnage, sur une machine des ateliers Bouhey et une machine des ateliers de l'Ouest, et pour le cisaillement sur une machine Bouhey. (Le numéro 8 a été omis par erreur dans le classement des aciers.)

DÉSIGNATION DU MÉTAL	ÉPAISSEUR		POINÇONNAGE OUEST	POINÇONNAGE BOUHEY	CISAILLEMENT BOUHEY
	Millimètres.		Millimètres.	Millimètres.	Millimètres.
Acier n° 1	5,4		11,5	7,5	9,5
	10,0		21,0	13,5	18,0
	25,0		»	»	»
Acier n° 2	5,0		9,0	6,0	8,2
	10,0		18,0	12,0	16,5
	15,0		»	18,5	24,0
	25,0		»	»	»
Acier n° 3	5,0		9,0	6,0	7,0
	10,0		17,0	12,0	14,0
	15,0		25,0	17,0	21,2
	20,0		»	22,5	»
	25,0		»	»	»
Acier n° 4	5,0		8,0	5,0	6,8
	10,0		15,0	10,0	13,5
	15,0		23,5	15,0	20,5
	20,0		»	19,0	»
	25,0		»	24,0	»
Acier n° 5	5,0	4,9	7,0	4,5	5,0
	10,0	10,1	13,0	9,0	11,0
	15,0	15,5	20,0	13,0	17,0
	20,0		»	17,5	24,0
	25,0		»	22,0	»
Acier n° 6	5,0		6,0	4,0	5,
	10,0		11,5	7,5	9,5
	15,0		17,0	11,0	13,5
	20,0		22,0	13,7	19,0
	25,0		»	17,5	24,0
Acier n° 7	5,0		6,5	4,0	5,5
	10,0		11,5	7,5	10,0
	15,0		17,5	11,5	15,0
	20,0		23,5	15,0	20,0
	25,0		»	18,5	25,0
Acier n° 9	4,5		6,0	4,8	5,3
	9,4		13,5	8,5	11,0
	14,9		21,0	13,8	17,5
	20,0		»	17,5	»
	25,0		»	21,5	»
Acier n° 10	4,6		6,0	3,5	5,2
	9,7		»,0	7,0	9,5
	14,2		17,0	10,5	13,5
	19,8		22,5	14,5	19,0
	25,0		»	18,5	25,0
Acier n° 11	4,8		5,0	3,0	4,0
	10,0		10,0	6,5	8,0
	15,0		15,0	9,5	12,0
	20,0		20,0	12,5	16,0
	25,0		»	15,5	20,0

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DÉSIGNATION DU MÉTAL	ÉPAISSEUR	POINÇONNAGE OUEST	POINÇONNAGE BOUHEY	CISAILLEMENT BOUHEY
	Millimètres.	Millimètres.	Millimètres.	Millimètres.
Acier n° 12.	5,0 4,9	»	3,5	5,0
	10,0	10,0	7,5	9,5
	15,0	17,0	11,0	14,0
	20,0 19,8	22,5	14,0	18,0
	25,0	»	17,5	24,0
Acier n° 13.	5,0 4,5	4,5	3,0	4,0
	10,0 9,4	9,0	6,0	7,5
	15,0	14,0	9,0	11,5
	20,0 19,6	19,0	12,0	15,0
	20,0	»	15,0	19,5
Acier n° 14.	5,2	5,0	3,0	4,0
	9,9	8,5	6,0	7,5
	14,8	13,5	8,5	11,0
	19,8	18,0	11,5	15,5
	25,0	»	14,5	20,0
Acier n° 15.	4,5	5,5	4,0	5,0
	9,6	11,5	7,5	9,5
	14,5	17,5	11,5	14,5
	19,6	23,0	14,5	19,5
	25,0	»	18,5	25,0
Acier n° 16.	4,7	7,0	»	6,0
	9,7	13,0	8,2	11,8
	14,6	19,0	13,5	18,0
	20,0	»	18,0	23,5
	23,0	»	22,5	30,0
Laiton	100 × 25	»	11,0	15,0
	65 × 25	»	»	9,5
	18,0	12,0	8,0	»
	10,0	»	4,3	»
Cuivre rouge	100 × 25	»	8,0	10,5
	65 × 25	»	»	7,0
	18,0	8,5	6,0	»

Ce tableau montre :

1° Que la résistance au poinçonnage est proportionnelle à l'épaisseur du métal poinçonné.

2° Que la résistance au cisaillement est proportionnelle à l'épaisseur du métal cisaillé.

une mesure indirecte, présentant même, à certains égards, une valeur comparable à celle qui se déduit de l'essai de traction. »

Les expériences visées dans la note précitée ont été effectuées avec deux poinçonneuses d'atelier qui ont été mises gracieusement à notre disposition, l'une dans les ateliers de la Compagnie de l'Ouest avec l'autorisation de MM. les ingénieurs en chef Clérault et Sauvage, l'autre par MM. Bouhey dans les ateliers de ces constructeurs. Avec ces machines, nous avons pu effectuer nos premières recherches, étudier au moins le phénomène dans ses grandes lignes et montrer que le poinçonnage apportait déjà des indications intéressantes sur la nature du métal expérimenté. Il convient évidemment de pousser plus loin ces expériences pour tâcher d'élucider les divers points laissés en suspens, mais c'est là un travail qu'il était impossible d'effectuer sur des machines d'atelier.

Celles-ci, en effet, ne sont pas disposées pour cette étude; le plus souvent elles présentent peu de profondeur dans l'ouverture du col de cygne, de sorte que les flexions du bâti sont peu accentuées et donnent dès lors des diagrammes présentant des différences d'ordonnées trop peu apparentes, d'autre part le montage des appareils enregistreurs se fait toujours à titre nécessairement provisoire et ne peut pas présenter le caractère de précision de l'installation permanente d'une machine d'étude.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU III

Étude du poinçonnage comme méthodes d'essai par MM. Frémont et Baclé.

RAPPROCHEMENT COMPARATIF DES DEUX RÉSISTANCES DE RUPTURE AU POINÇONNAGE ET A LA TRACTION

NATURE DU MÉTAL	RÉSISTANCE AU POINÇONNAGE				RÉSISTANCE A LA TRACTION		RAPPORT DE LA RÉSISTANCE au poinçonnage à la résistance à la traction.	
	ÉPAISSEUR en millimètres.	SURFACE tranchée en millimètres carrés.	CHARGE DE RUPTURE		CHARGE DE RUPTURE par millimètre carré.			
			TOTALE	par millimètre carré.	LABORATOIRE de la marine.	CHEMINS de fer de l'Ouest.	MARINE	CHEMINS de fer de l'Ouest.
	Millimètres.	Mill. carrés	Kilogr.	Kilogr.	Kilogr.	Kilogr.		
Laiton de Pontgibaud . . .	10,0	800	16.700	21,00	»	31,00	»	0,68
Cuivre rouge de Pontgibaud.	10,0	800	12.000	15,25	»	21,50	»	0,70
Laiton de Sérifontaine. . .	5,7	456	8.950	19,50	30,00	»	0,65	»
	7,2	576	12.500	21,60	30,00	»	0,72	»
	11,0	880	18.000	20,40	30,00	»	0,68	»
	11,2	896	18.500	20,60	30,00	»	0,69	»
Acier de Firminy. n° 1. .	6,0	480	50.000	62,50	87,00	96,25	0,71	0,66
Acier de Firminy. n° 2. .	6,0	480	27.000	56,20	78,70	84,00	0,71	0,67
Acier de Firminy. n° 3. .	6,0	480	23.400	48,70	66,00	73,50	0,73	0,66
Acier de Firminy. n° 4. .	6,0	480	22.100	46,00	61,30	65,50	0,75	0,70
— MM. Marrel frères (n°9).	6,0	480	20.200	42,00	56,60	39,35	0,74	0,71

Ce tableau montre :

1° Que la résistance au poinçonnage est proportionnelle à la résistance à la traction ;

2° Que le rapport de cette proportion est d'environ de $\frac{7}{10}$.

Les essais de poinçonnage ont été exécutés avec un poinçon de $25^{m}/^{m}$ de diamètre et une matrice de $26^{m}/^{m}$ de diamètre.

Le périmètre tranché a ainsi une longueur de $80^{m}/^{m}$ $\left(\frac{25 \times 26}{2} \times \pi\right) = 80^{m}/^{m}11$.

Ces essais ont été pratiqués au Laboratoire central de la Marine par M. l'Ingénieur G. Charpy, avec l'autorisation de M. le colonel Leherle.

Enfin l'immobilisation forcée des machines employées est toujours une cause de gêne très appréciable pour le travail des ateliers, et, malgré la bienveillance qui nous a été témoignée et pour laquelle nous tenons à renouveler ici l'expression de notre gratitude, nous ne pouvions pas prolonger outre mesure le dérangement forcé que ces expériences entraînaient. Dans cette situation qui nous faisait ressentir vivement les inconvénients résultant de l'absence d'un laboratoire d'essais, M. Frémont s'est décidé à constituer un pareil laboratoire avec ses seules ressources, et il a étudié en particulier l'installation d'une poinçonneuse d'étude disposée précisément de façon à fournir des diagrammes amplifiés permettant l'étude détaillée des phénomènes dans toutes ses phases. Il décida d'employer à cet effet une machine actionnée à la main, dont le fonctionnement par conséquent peut être arrêté à volonté, au cours d'une opération de poinçonnage, lorsqu'on tient à faire l'étude spéciale du diagramme en un point particulier de la course. D'autre part, il augmenta grandement la profondeur du col de cygne qui fut portée à 80 centimètres sur le type de machine ainsi réalisé. Le bâti fut exécuté en acier moulé, de façon à présenter plus de résistance et d'élasticité que la fonte, et, dans ces conditions, nous avons réussi à obtenir une flexion du bâti de 2 millimètres par tonne d'effort développé. Cette flexion est ensuite amplifiée 5 fois par l'appareil enregistreur et on obtint dès lors des ordonnées atteignant à peu près 4 à 7 fois celles des premiers diagrammes. Nous donnons, du reste, plus loin la description et la vue de cette machine (fig. 48).

En même temps, M. de Maupeou, directeur des constructions navales à Lorient, qui avait bien voulu s'intéresser à nos recherches, confiait à M. Frémont la commande d'une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

machine analogue dont il voulait se servir pour certaines expériences de poinçonnage et d'emboutissage.

D'autre part, deux grandes aciéries, comprenant tout l'intérêt que présente pour elles le poinçonnage au point de vue d'une appréciation plus rapide de la qualité des produits en cours de fabrication, se sont décidées à commander de leur côté des machines analogues, et elles comptent s'en servir désormais d'une façon régulière dans la pratique courante.

Ces machines, exécutées dans les ateliers de M. Champigneul, ont été terminées il y a quelques mois seulement (juin 1900); elles sont livrées actuellement aux établissements qui les ont commandées, et il y a lieu de penser que, dans les mains des ingénieurs distingués qui vont les mettre en œuvre, elles donneront des renseignements de haute importance, et justifieront ainsi l'intérêt qui s'attache à l'application du poinçonnage comme méthode d'épreuves.

La préparation de ces machines a retardé toutefois l'exécution de la poinçonneuse d'études dont nous comptions nous servir, et les remaniements successifs qu'il a fallu apporter d'autre part dans l'installation de l'appareil enregistreur ont entraîné en outre une nouvelle cause de retard, de sorte que nous n'avons pu disposer de cette poinçonneuse que pendant une période de quelques jours seulement avant qu'elle fût envoyée à l'Exposition, où elle figure actuellement.

Ces expériences ont porté sur une partie des barres sur lesquelles nous avions opéré précédemment; et nous avons d'abord amené celles-ci à une épaisseur permettant d'y effectuer le poinçonnage d'un trou de 25 millimètres sans dépasser l'effort de 60 000 kilogrammes représentant la puissance normale de la machine. Le poinçonnage de ces barres nous a donné les diagrammes que nous reproduisons en grandeur naturelle dans les figures 32 à 45, et nous en avons tiré une indication nouvelle de la résistance du métal expérimenté.

Fig. 32.

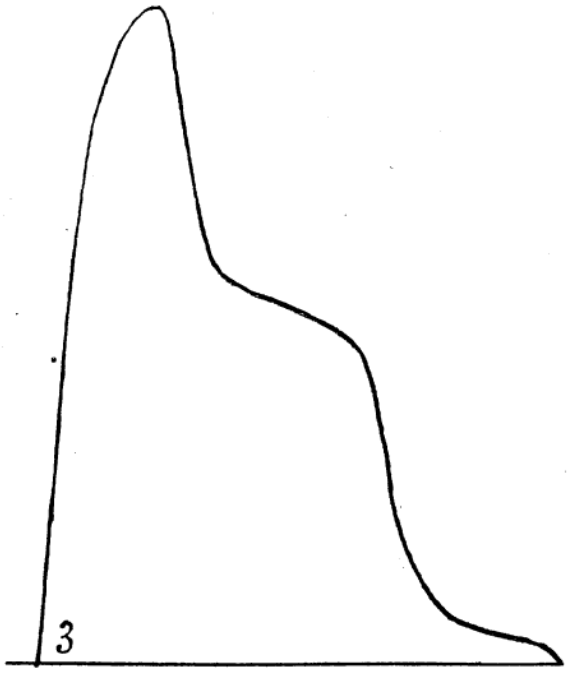


Fig. 33.

Disons tout d'abord que nous avons répété fréquemment l'expérience consistant à reprendre à plusieurs reprises le poinçonnage d'une même barre en faisant toujours partir le crayon de l'enregistreur du même point initial, de façon à tracer autant de diagrammes susceptibles de se recouvrir, et nous avons constaté que, là encore, ce recouvrement s'opère dans les conditions les plus satisfaisantes, le crayon passe toujours exactement en effet par les mêmes points et reprend avec une fidélité invariable les mêmes oscillations dans les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

diagrammes successifs. Le diagramme ainsi obtenu peut être considéré par conséquent comme représentant bien la qualité moyenne de la barre étudiée. Ce résultat est bien celui que nous avons observé dans nos premières expériences; mais, comme les diagrammes

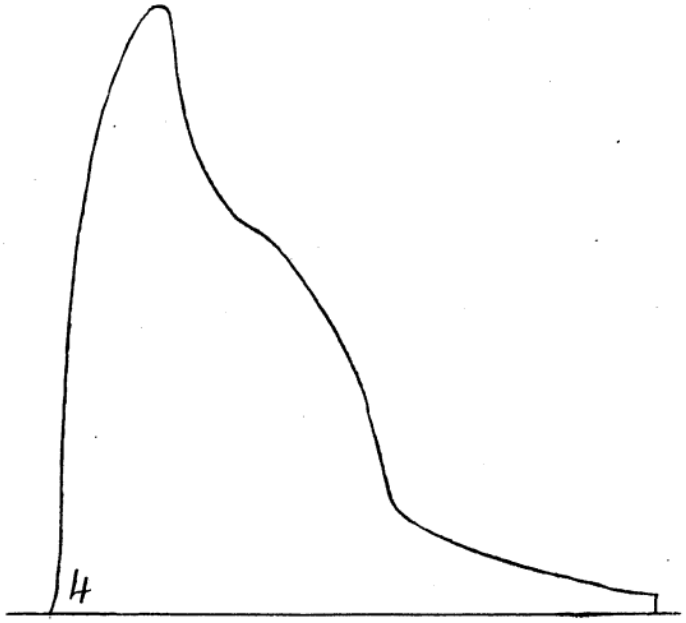


Fig. 34.

étaient alors beaucoup plus petits, on aurait pu attribuer cette concordance au défaut d'amplitude des ordonnées; il était donc d'autant plus intéressant de constater qu'elle se retrouve encore sur les nouveaux diagrammes agrandis.

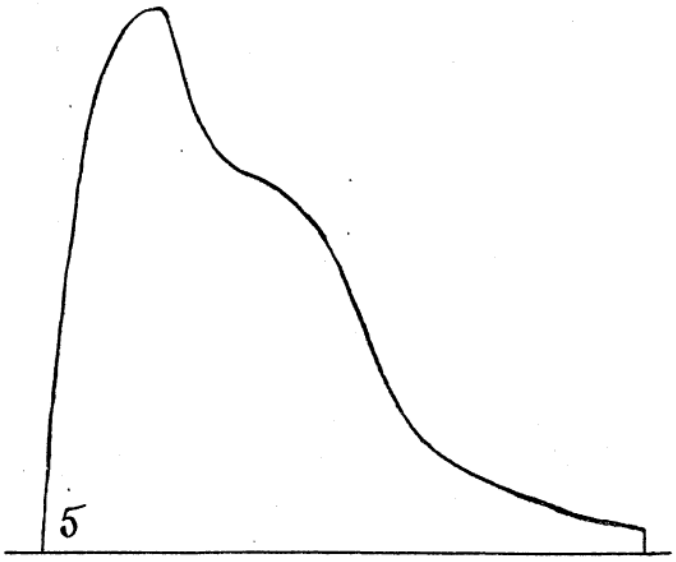


Fig. 35.

C'est là, du reste, un résultat que ne saurait donner l'essai à la traction, lorsqu'on opère sur des produits purement commerciaux, et l'expérience a montré, en effet, qu'on obtient souvent des écarts dépassant 10 pour 100 sur des éprouvettes détachées d'une même pièce,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ainsi que d'ailleurs nous le rappellerons plus bas; le poinçonnage présente donc à ce point de vue une supériorité marquée, et celle-ci s'explique immédiatement, du reste, par le fait

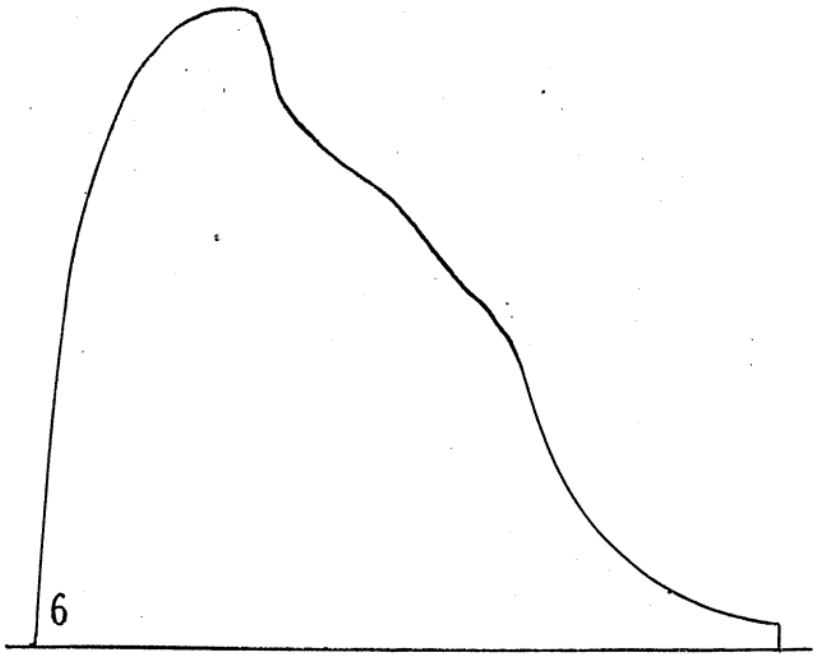


Fig. 36.

que la surface de métal tranchée dépasse de beaucoup celle qui est rompue dans les condi-

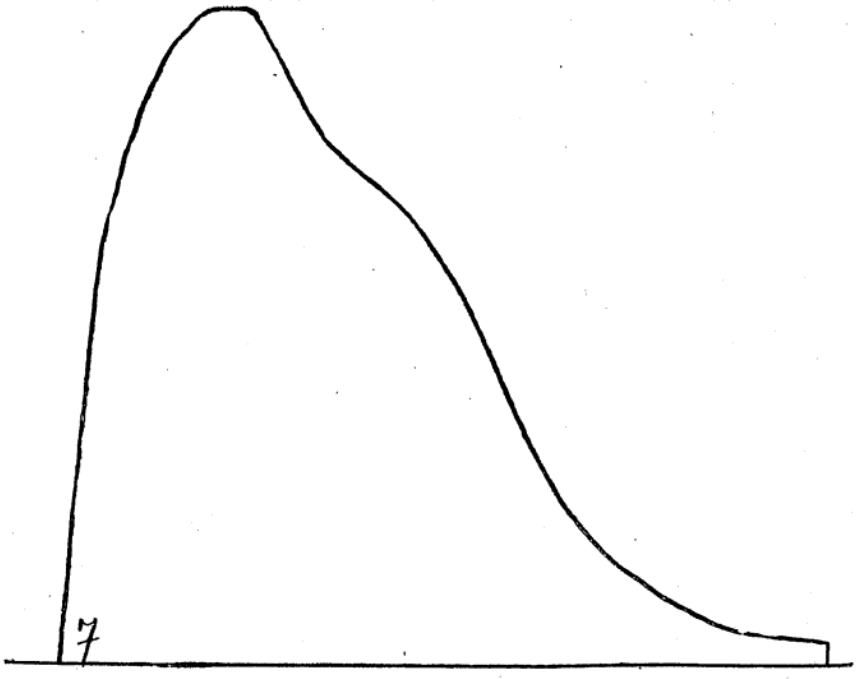


Fig. 37.

tions habituelles d'essai à la traction, et, comme le métal éprouvé présente une constitution nécessairement hétérogène, les irrégularités inévitables affectant la composition de la sec-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion tranchée disparaissent d'autant mieux dans les résultats d'ensemble que la superficie intéressée est elle-même plus étendue.

Une fois en possession de ces nouveaux diagrammes, nous avons cherché à dégager

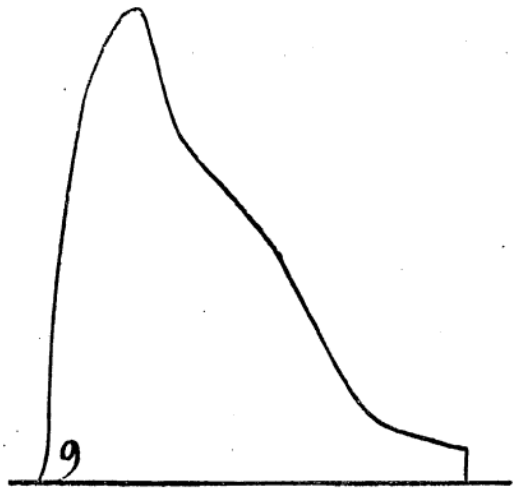


Fig. 38.

immédiatement l'ordonnée maximum qui mesure, ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, la résistance effective du métal.

Nous avons d'ailleurs tracé cette ordonnée en relevant l'arc de cercle tracé par le crayon

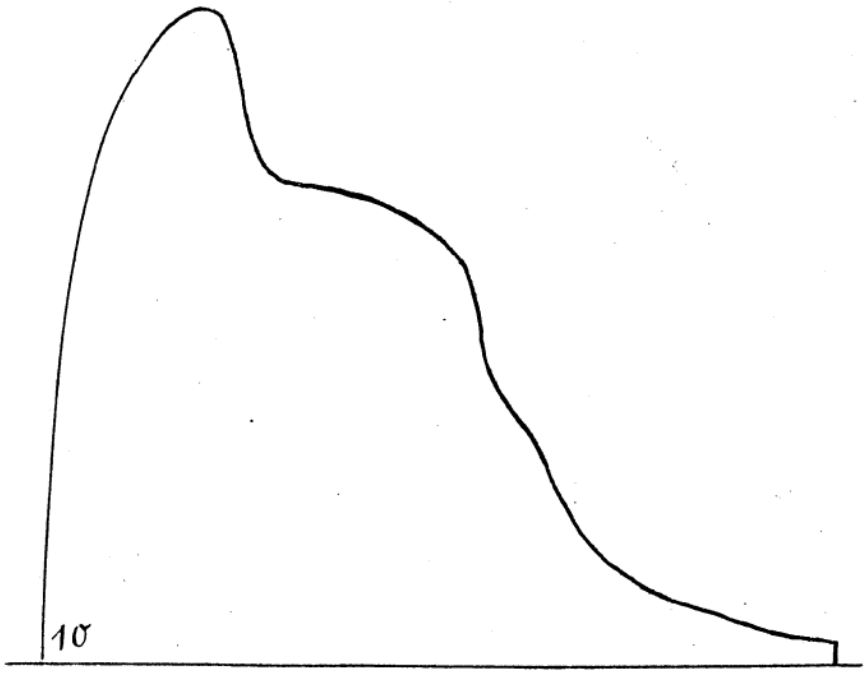


Fig. 39.

lorsque le poinçon est soumis à des efforts croissants pendant que le papier enregistreur est maintenu immobile. Nous avons ainsi obtenu une courbe que nous avons pu graduer une fois pour toutes en relevant les positions successives du crayon correspondantes à des charges connues appliquées sur le poinçon. Nous avons pu constater d'ailleurs que les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déplacements du crayon restaient rigoureusement proportionnels aux efforts développés, ainsi que nous l'avions déjà constaté du reste sur les premiers diagrammes. Nous avons pu, dès lors, graduer cette courbe avec grande facilité et nous en servir pour la représentation et la mesure de l'ordonnée maximum.

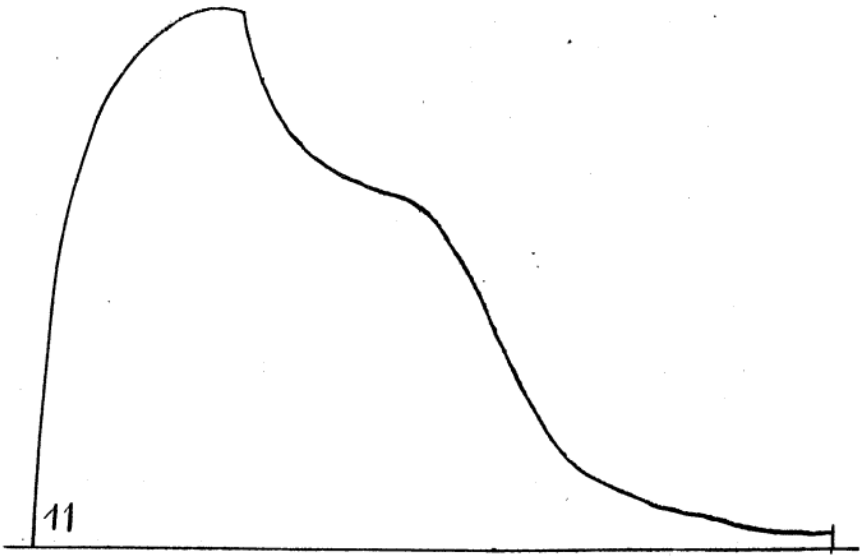


Fig. 40.

Connaissant ainsi l'effort total développé, nous avons pu en déduire l'effort correspondant par unité de section tranchée, en tenant compte d'ailleurs de l'épaisseur de la barre éprouvée. Nous avons rappelé précédemment, en effet, que cet effort total est bien proportionnel à l'épaisseur, puisque l'ordonnée qui le mesure présente toujours cette proportionnalité.

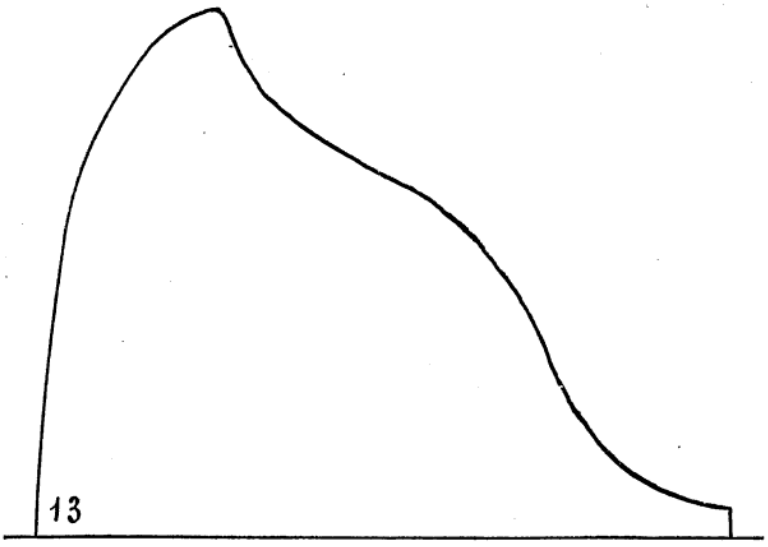


Fig. 41.

L'effort unitaire ainsi obtenu sert à caractériser la nuance du métal en indiquant la résistance dont il est susceptible; il nous permet donc de définir immédiatement la nuance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de dureté de l'acier éprouvé, et il donne à cet égard le même renseignement que fournirait l'essai à la traction. On peut objecter sans doute que le résultat ainsi obtenu n'est pas

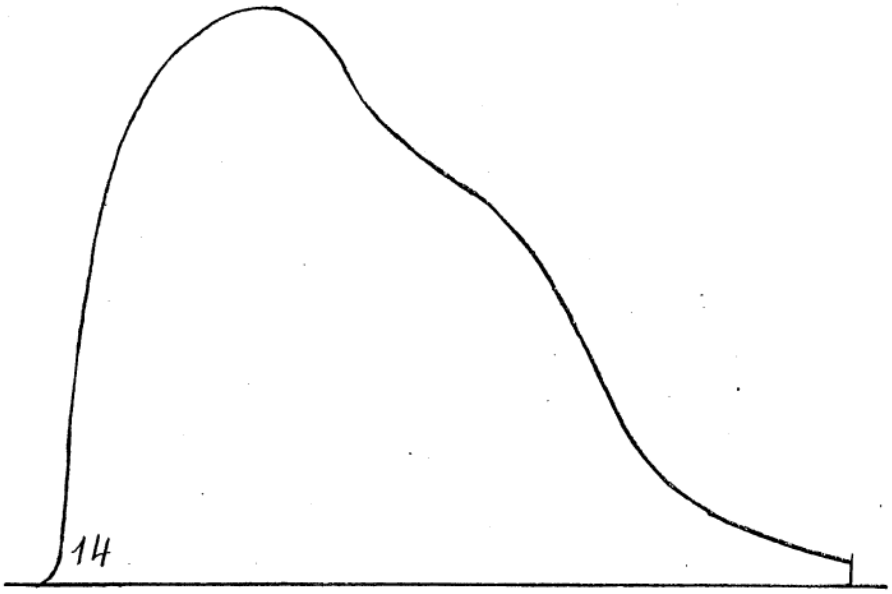


Fig. 42.

défini avec la même précision dans les deux cas; mais il faut observer, par contre, qu'à certains égards la précision due à la traction est plutôt apparente que réelle, puisque l'expé-

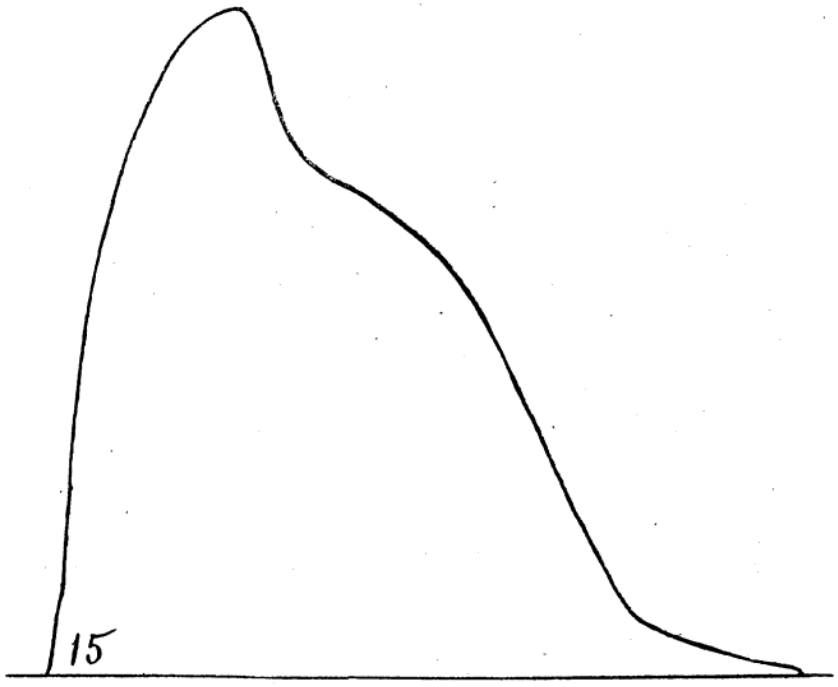


Fig. 43.

rience nous montre le plus souvent deux essais successifs donnant des résultats très divergents.

Comme exemple de ces variations, nous réunissons, du reste, dans le tableau suivant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(n° IV) les résultats comparatifs des essais à la traction effectués sur les barres étudiées avec trois machines d'essais différentes appartenant l'une à la Compagnie des chemins de

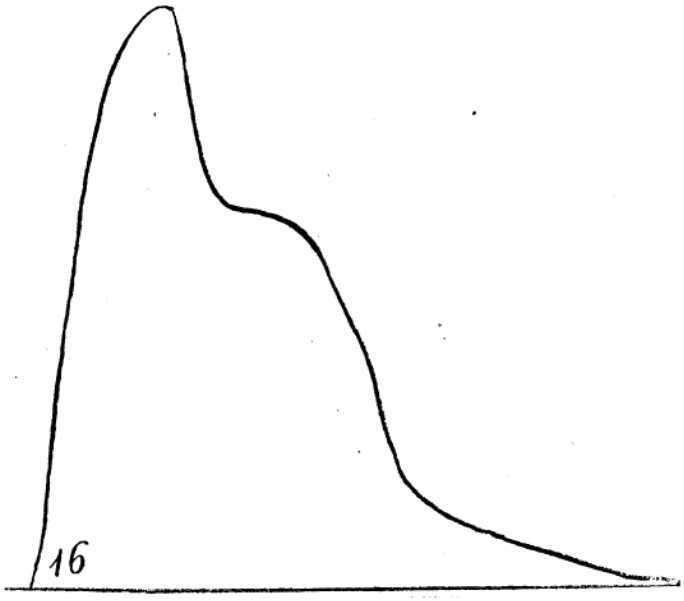


Fig. 44.

fer de l'Ouest, la seconde au Laboratoire d'artillerie de marine, et la troisième construite suivant les indications de M. Frémont d'après un type étudié par lui et dont nous donnons,

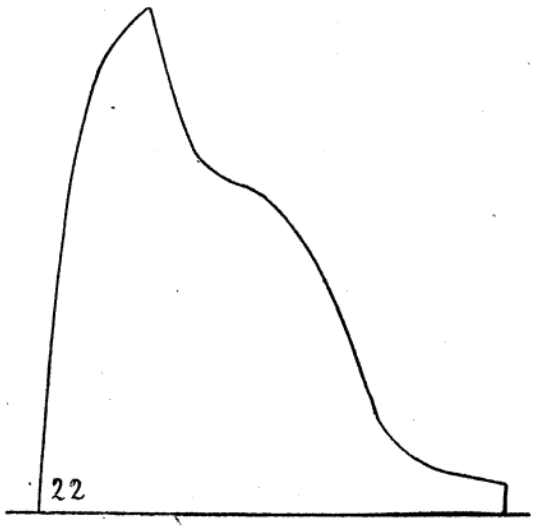


Fig. 45

du reste, la description plus loin. En comparant ces résultats, on constatera qu'ils présentent des écarts atteignant souvent et dépassant même 10 pour 100.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU IV

Essais de poinçonnage.

RAPPROCHEMENT COMPARATIF DES RÉSULTATS OBTENUS DANS TROIS ESSAIS A LA TRACTION EFFECTUÉS SUR LES BARRES POINÇONNÉES

NUMÉROS des BARRES	ESSAIS AUX ATELIERS de la COMPAGNIE DE L'OUEST		LABORATOIRE de la MARINE		MACHINE D'ESSAI de M. FRÉMONT	
	Résistance.	Allongement.	Résistance.	Allongement.	Résistance.	Allongement.
	Kilogrammes.	0/0	Kilogrammes.	0/0	Kilogrammes.	0/0
1	96,25	9	87	»	93,35	6,6
2	84	13,5	78,70	»	85,70	13
3	75,50	19,5	66	»	76	16,50
4	65,50	19,75	61,50	»	68	14,50
5	55,85	23,25	»	»	52,50	23
6	42,25	30,25	»	»	43,70	30
7	44,50	23,50	»	»	47,30	24,50
9	59,35	23,25	57,60	28	60,30	23,50
10	44	23,25	45,65	29	44,85	28
11	37,75	23,50	36,40	34	37	28,50
12	43,50	24,75	42,70	30,50	»	»
13	32,50	27,25	34,50	24	33	24,50
14	33	26,25	33,10	30,50	33,50	32,75
15	45,50	23	42,30	27	47	27
16	59,25	19,75	»	»	60,70	22
20	»	»	»	»	51	22
21	»	»	»	»	39,85	23,25
22	»	»	»	»	53,55	23,25
23	»	»	»	»	49,15	27
24	»	»	»	»	46	27,50
25	»	»	»	»	45	27,50
26	»	»	»	»	49,90	27,50

Nous rappelons, du reste, que ces écarts n'ont rien d'exceptionnel, ainsi que le fait a été constaté bien souvent. Dans l'intéressant rapport qu'il présentait à ce sujet devant la Commission française, M. Sauvage à pu, en effet, citer à son tour de nombreux cas analogues, comme l'avaient déjà fait avant lui MM. Lebasteur et Barba. Ainsi que l'observe d'ailleurs M. Sauvage, les quantités mesurées dans l'essai à la traction ne sont pas des grandeurs physiques exactement définies; la résistance à la rupture par millimètre carré est simplement le résultat de la division de l'effort le plus grand supporté, au cours de l'essai par la section initiale; comme les allongements qui précèdent cet effort maximum ne réduisent pas beaucoup la section, la charge de rupture ainsi définie reste assez constante pour un métal donné, lorsque celui-ci est bien homogène. Par contre, on voit immédiatement que, si l'homogénéité n'est pas complète, les écarts signalés s'augmentent aussitôt et dans une trop large mesure.

Nous montrerons, du reste, plus loin, que ces divergences ont encore beaucoup plus d'importance pour les allongements, qui, eux non plus, ne sont pas des grandeurs physiques déterminées.

Dans cette situation, pour s'en tenir d'abord à ce qui concerne la résistance, on peut rapprocher les chiffres obtenus dans l'essai de poinçonnage de ceux de l'essai à la traction, de façon à reconnaître s'ils restent toujours dans un rapport déterminé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU V

Essais de poinçonnage.

COMPARAISON DES RÉSULTATS DÉDUITS DU RAPPROCHEMENT DE LA RÉSISTANCE DÉTERMINÉE D'APRÈS L'ORDONNÉE DES DIAGRAMMES FOURNIS PAR LA POINÇONNEUSE D'ÉTUDE HYDRAULIQUE AVEC LA RÉSISTANCE DÉDUITE DE L'ESSAI A LA TRACTION

(Les barres expérimentées ont été poinçonnées aux épaisseurs indiquées au tableau et percées toutes d'un trou ayant uniformément 25 millimètres de diamètre. Le tarage de la machine a montré que chaque millimètre de hauteur de l'ordonnée correspondait exactement à un effort de 524 kilogrammes exercé sur le poinçon. On a déterminé, d'après la valeur de l'ordonnée, celle de l'effort total exercé sur le poinçon, et on en a déduit la résistance par unité de section en divisant l'effort total par la section tranchée. La résistance au poinçonnage ainsi obtenue a été rapprochée de la résistance déduite de l'essai à la traction.

Il a été effectué deux essais à la traction sur chacune des barres portant les numéros 9 à 16, et le rapprochement avec la résistance au poinçonnage a été établi pour le résultat de chacun de ces essais.)

NUMÉROS DES BARRES essayées.	ÉPAISSEUR DES BARRES en millimètres.	ORDONNÉES MAXIMUM du poinçonnage en millimètres.	RÉSISTANCE TOTALE au poinçonnage.	RÉSISTANCE par MILLIMÈTRE CARRÉ R_P	RÉSISTANCE à la TRACTION R_T	RAPPORT $\frac{R_P}{R_T}$
			Kilogrammes.	Kilogrammes.	Kilogrammes.	
2 . . .	9,5	76	39.850	53,5	85,70	0,63
3	12,8	102	53.450	53,2	76	0,71
4	13	94,5	49.520	48,50	68	0,71
5	13	84,5	44.250	43	52,5	0,81
6	19	99	51.880	34,75	43,70	0,80
7	17,3	101	52.940	38,70	47,30	0,81
9	11	74,9	39.100	45,30	60,30	0,75
	»	»	»	»	57,20	0,79
10	18,2	103	54.000	37,78	44,85	0,84
	»	»	»	»	43,65	0,86
11	18	84	44.020	31,15	37	0,84
	»	»	»	»	36,40	0,86
13	19	82	43.000	28,6	33	0,86
	»	»	»	»	34,50	0,83
14	19	89	46.600	31,2	33,50	0,93
	»	»	»	»	33,10	0,94
15	18	105	55.020	38,90	47	0,82
	»	»	»	»	42,30	0,92
16	19	91	47.680	46,70	60,70	0,77
	»	»	»	»	57,20	0,81
22	12,5	78,5	41.140	41,90	53,50	0,78

Nous avons effectué à cet effet ce rapprochement, dont nous indiquons les résultats dans le tableau n° V. On remarquera immédiatement, d'après ce tableau, que ce rapport n'est pas absolument constant; mais c'est là, du reste, une conséquence qu'on devrait prévoir, puisque les résultats de la traction présentent eux-mêmes des variations accentuées, comme nous venons de le rappeler. Ce rapport reste en général voisin de 0,75; il varie, sauf certains cas exceptionnels, de 0,70 à 0,80, présentant ainsi des écarts de 10 %, lesquels restent toujours comparables, par conséquent, à ceux de l'essai de traction.

Ce résultat établit nettement le parallélisme manifeste des deux méthodes d'essai, et il montre bien dès lors que cette indication de la résistance au poinçonnage suffit pour caractériser la nuance de dureté du métal étudié. On ne peut sans doute pas espérer davantage du poinçonnage; mais, du reste, lorsqu'on se place bien en face de la réalité des choses, on reconnaît que l'essai de traction ne donne pas beaucoup plus, et là non plus, avec les produits commerciaux, on ne peut guère compter connaître la résistance exacte d'un métal, à moins d'une approximation atteignant souvent plusieurs kilogrammes par millimètre carré. A côté de cette comparaison avec les résultats de la traction, et pour bien apprécier la valeur exacte du poinçonnage, comme méthode d'essai, il était intéressant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'effectuer le rapprochement des ordonnées des diagrammes obtenus au moyen des trois poinçonneuses que nous avons successivement employées. Nous avons donc rapproché, à cet effet, dans le tableau n° VI, les ordonnées des diagrammes fournis par des barres de même épaisseur, essayées successivement avec les poinçonneuses d'atelier de la compagnie de l'Ouest et de M. Bouhey, puis avec la machine d'étude de M. Frémont. Le temps très limité dont nous disposions pour les expériences ne nous a permis d'essayer, avec la machine d'étude, qu'une seule épaisseur pour chaque barre, et, par suite, pour rendre les résultats comparables, nous avons dû rapporter à cette même épaisseur les ordonnées fournies antérieurement par les deux poinçonneuses d'atelier. Nous avons ainsi obtenu les rapports inscrits au tableau VI, et on reconnaîtra également par l'examen que ces rapports se maintiennent assez bien constants : l'ordonnée du diagramme de la poinçonneuse d'étude atteint généralement, en effet, 4 fois 1/2 celle du diagramme correspondant de la poinçonneuse Ouest, et 7 fois celle de la machine Bouhey.

TABLEAU VI

Essais de poinçonnage.

RAPPROCHEMENT DES ORDONNÉES FOURNIES PAR LA POINÇONNEUSE D'ÉTUDE AVEC CELLES DES DEUX POINÇONNEUSES D'ATELIER DE LA COMPAGNIE DE L'OUEST ET DE MM. BOUHEY

NUMÉROS DES BARRES essayées.	ÉPAISSEUR DES BARRES en millimètres.	ORDONNÉES DE LA POINÇONNEUSE d'étude. E	ORDONNÉES DE LA POINÇONNEUSE Ouest. O	RAPPORT $\frac{E}{O}$	ORDONNÉES DE LA POINÇONNEUSE Bouhey. B	RAPPORT $\frac{E}{B}$
		Les ordonnées sont indiquées en millimètres.				
2	9,5	76	17	4,5	11,5	6,6
3	12,8	102	21	4,8	15	6,8
4	13,0	94,5	20	4,7	13	7,2
5	13,0	84,5	17	4,9	11,5	7,2
6	19	99	21	4,7	13	7,6
7	17,3	101	20,5	4,9	13,3	7,6
9	11	74,9	16	4,6	10	7,5
10	18,2	103	21	4,9	13,6	7,5
11	18	84	18	4,6	11,5	7,3
13	19	82	18,5	4,4	11,6	7,0
14	19	89	17,5	5	11,2	7,8
15	18	105	21,2	4,9	14	7,5
16	13	91	17	5	12,1	7,4

Là encore nous trouvons des écarts appréciables : le premier rapport varie, en effet, de 4,5 à 5 ; le second varie de 6,6 à 7,5 ; toutefois, ces variations restent toujours contenues dans les mêmes limites que celles de l'essai à la traction.

Il y aurait à examiner maintenant la question de l'allongement, mais les expériences de poinçonnage que nous avons pu effectuer jusqu'à présent sont malheureusement en trop petit nombre pour que nous puissions déjà présenter à cet égard rien de suffisamment précis.

Ainsi que nous l'avions déjà remarqué dans nos premières recherches, l'abscisse de l'ordonnée maximum est incontestablement une résultante directe de la propriété d'allongement du métal qu'elle accuse ainsi en une certaine manière : elle varie, en effet, dans le même sens que cet allongement, elle augmente ou diminue avec lui. Nous ne sommes pas encore en mesure d'établir une relation déterminée entre ces deux quantités, car les variations de cette abscisse dépendent aussi de l'épaisseur de la section tranchée, et nous n'avons pas encore pu dégager ces deux éléments l'un de l'autre. Nous avons lieu de penser

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cependant que l'allongement ainsi donné par l'abscisse du diagramme de poinçonnage n'est pas la même quantité qui se révèle dans l'essai à la traction, lorsqu'on mesure simplement, comme on le fait presque toujours, la distance des repères après la rupture de l'éprouvette. On voit, en effet, que la donnée ainsi recueillie englobe deux quantités tout à fait distinctes, n'ayant entre elles aucun rapport nécessaire, l'allongement réparti et l'allongement de striction. L'allongement réparti n'est que la somme des extensions élémentaires qui se sont déclarées tour à tour et de façon intermittente sur diverses sections de l'éprouvette ; l'allongement de striction, au contraire, est l'extension qui s'est localisée dans le voisinage immédiat de la section de rupture, dès que la charge maximum est atteinte. Ce dernier élément montre, en fait, l'allongement dont le métal est susceptible en un point donné ; il correspond ainsi à une propriété bien déterminée, tandis qu'il n'en est pas de même de l'allongement réparti qui réunit des éléments dus en quelque sorte au hasard, et prend par suite un caractère essentiellement arbitraire.

Il n'est pas étonnant dès lors que cet allongement global présente des variations beaucoup plus considérables encore que celles de la charge de rupture, lorsqu'on rapproche les résultats obtenus sur des éprouvettes détachées en différents points d'une même pièce. Dans le résumé qui termine l'intéressant rapport dont nous parlions plus haut, M. Sauvage a pu dire, en effet, que, sur une série de pièces fabriquées dans les mêmes conditions, les variations de l'allongement peuvent atteindre 25 % en plus ou en moins de la moyenne, ce qui peut donner, comme on voit, une différence du simple au double entre le résultat maximum et le minimum.

Dans de pareilles conditions, on comprend immédiatement que l'allongement global fourni par l'essai à la traction ne saurait se retrouver intégralement dans le poinçonnage, et qu'on ne peut donc pas espérer obtenir un rapport constant lorsqu'on voudra comparer l'abscisse de ce diagramme avec un élément variable et irrégulier par essence comme celui-ci. En analysant, du reste, plus rigoureusement le phénomène, nous sommes portés à croire que la donnée fournie par l'abscisse du diagramme de poinçonnage doit se confondre avec l'allongement de striction ; c'est exclusivement, en effet, par striction que travaille le métal, au moment où il s'étire en se déchirant sous l'action du poinçon, car la période d'allongement réparti paraît complètement absente dans ce cas. Nous estimons donc qu'il conviendrait de rectifier à ce point de vue notre première appréciation en indiquant que, seul, l'allongement de striction peut être retrouvé dans le diagramme de poinçonnage ; nous ajouterons qu'il convient de le chercher dans l'abscisse de l'ordonnée maximum et non pas, comme nous l'avions pensé d'abord, dans la partie du diagramme située au delà de cette ordonnée. Il faut observer, en effet, qu'au moment où l'effort maximum est atteint le métal est déjà déchiré sur la plus grande partie de l'épaisseur de la section, et l'effort développé ensuite correspond seulement au travail d'expulsion de la débouchure.

C'est là une prévision qui sans doute aura besoin d'être vérifiée par de nouvelles et nombreuses expériences, mais on peut considérer toutefois qu'elle s'appuie avec un caractère de grande probabilité sur la théorie du poinçonnage précédemment exposée.

S'il en est ainsi, on reconnaît dès lors que l'observation du diagramme de poinçonnage prendra d'autant plus d'intérêt lorsqu'on aura pu y retrouver la mesure de l'allongement de striction, puisqu'elle apportera, par là même, un élément caractéristique particulièrement difficile à dégager dans des essais actuels à la traction.

RÉSUMÉ

L'exposé qui précède montre tout l'intérêt des renseignements que peut fournir l'application du poinçonnage, comme méthode d'essai, pour l'appréciation de la qualité des métaux. Cette méthode apporte immédiatement, comme on voit, l'indication de la charge de rupture et probablement aussi celle de l'allongement de striction, réunissant ainsi les deux données les plus importantes que fournit l'essai à la traction.

Si l'on se rappelle, d'autre part, les avantages essentiels que présente l'épreuve du poinçonnage dans la pratique courante, en ce qu'elle utilise, en effet, les opérations mêmes de fabrication, et n'entraîne dès lors aucun déchet, aucune dépense inutile de temps ou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'argent, si l'on considère en outre qu'elle peut s'appliquer à presque toutes les pièces mises en œuvre, qu'elle fournit ainsi le moyen vainement cherché jusqu'à présent de les apprécier sans les détériorer, on comprendra que cette méthode d'essai, ainsi complétée par l'adjonction des appareils enregistreurs, est appelée certainement à remplir les prévisions qui formaient pour elle, ainsi que nous l'exposons plus haut, des praticiens aussi expérimentés que MM. Smith, Sandberg, Dudler, Coudron, Johnson, Hunt, Berrier-Fontaine, Tolmer, etc., car elle constituera un adjuvant des plus précieux pour l'apparition des produits courants, et même dans les grandes forges un guide autorisé qu'elles consulteront utilement aux diverses étapes de la fabrication des produits de choix.

Les pièces qui sont traitées par poinçonnage, comme les tôles, les profilés de toute catégories et spécialement les rails, pourront subir ainsi un essai individuel permettant d'écarter les pièces douteuses qu'il est à peu près impossible de déceler autrement, et, dans la fabrication même, une épreuve aussi simple et rapide que le poinçonnage pourra toujours être appliquée sans difficulté pour apprécier les modifications de qualité que peuvent entraîner pour la pièce en cours d'élaboration les opérations successives auxquelles elle est soumise.

DESCRIPTION DES DIVERSES MACHINES EMPLOYÉES POUR LES ESSAIS MENTIONNÉS PLUS HAUT

En terminant le présent travail, nous donnerons la description des diverses machines que nous avons employées pour l'exécution des essais les plus récents dont nous relatons les résultats.

MACHINE D'ESSAI A LA TRACTION

La machine d'essai à la traction imaginée par M. Frémont, et dont la figure 46 donne la vue extérieure, reproduit la disposition fondamentale de la poinçonneuse dont nous avons

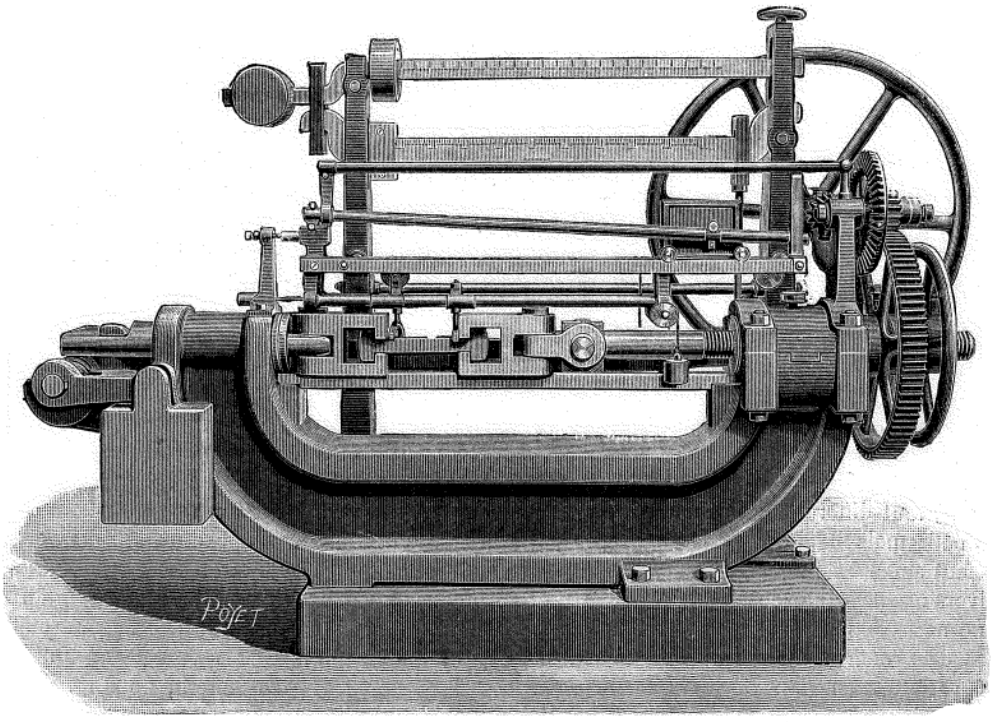


Fig. 46.

parlé précédemment; comme celle-ci, en effet, elle enregistre en les amplifiant les déformations élastiques du bâti, et elle les applique à la mesure des efforts développés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce mode d'enregistrement des efforts qui constitue l'originalité de cette machine a, du reste, donné lieu à des observations particulièrement intéressantes sur la marche générale du phénomène de traction. Il fournit, en effet, la représentation détaillée des tensions instantanées qui se développent successivement sur l'éprouvette soumise à la traction, et il permet dès lors de reconnaître que ces tensions subissent des variations continuelles manifestées par les tremblements incessants de la courbe du diagramme. Ainsi qu'on le voit d'après l'exemple reproduit fig. 47, cette courbe prend en effet un aspect tourmenté qui ne se retrouve jamais au même degré avec les appareils enregistreurs des machines d'essai ordinaires.

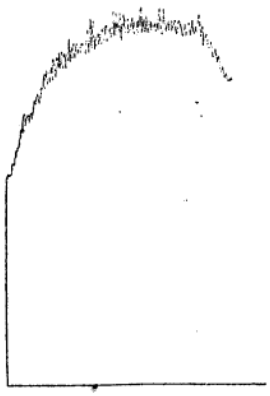


Fig. 47.

Ceux-ci agissent en traçant des courbes régulières et continues, et ils suppriment ainsi en quelque sorte ces écarts continuels qu'accuse un enregistreur serrant de plus près la vérité des faits.

Il y a lieu de penser, dès lors, que cet aspect tourmenté des diagrammes nous donne bien l'image exacte des variations continuelles qu'éprouvent les réactions transmises au bâti par la barrette soumise à l'essai. Nous savons déjà que l'allongement élémentaire ne se manifeste pas d'une façon continue sur toute l'étendue de cette barrette, mais qu'il apparaît par intermittences sur des sections successives qui se déforment tour à tour d'une quantité infinitésimale, et rentrent ensuite dans le repos pendant que l'allongement se manifeste désormais sur des sections nouvelles complètement distinctes et indépendantes des premières. Chaque section ainsi définie semble donc réagir, à son tour, en développant un effort nécessairement variable d'une section à l'autre, et c'est la série complète de ces efforts successifs que le diagramme ainsi obtenu a recueillie avec fidélité.

Nous avons dès lors la possibilité d'analyser le phénomène dans ses détails, avec une précision minutieuse qui nous était interdite jusqu'à présent; nous retrouvons là encore sans doute un nouvel exemple des conséquences qu'entraîne cette hétérogénéité constitutionnelle des métaux si brillamment élucidée par la théorie cellulaire.

On peut s'étonner toutefois que les enregistreurs habituels des machines d'essai à la traction donnent au contraire des diagrammes continus, présentant par conséquent un aspect tout différent des courbes fournies par l'enregistrement des déformations élastiques du bâti; mais il faut considérer que cette différence doit trouver son explication dans un défaut spécial de sensibilité des machines habituelles; on doit admettre, en effet, que les divers organes interposés entre la barrette éprouvée et l'appareil enregistreur présentant une masse appréciable, sont retenus dès lors par une certaine inertie qui ne leur permet pas de prendre, de façon absolument instantanée, les positions correspondantes à toutes les variations successives de l'effort exercé. Dans les romaines, par exemple, nous rencontrons une suite de leviers connexes qui doivent agir les uns sur les autres en provoquant une série de déplacements dont la réalisation ne peut pas être immédiate. Si l'on opère au contraire sur des machines à pression hydraulique, on doit compter de même avec l'inertie du liquide interposé, avec celle du manomètre indicateur, et surtout avec l'influence des frottements, lesquels varient nécessairement, comme on sait, suivant que le liquide est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

animé d'un mouvement plus ou moins rapide, sortant ou non de la position de repos.

Il y a toujours là, en un mot, une série d'organes de transmission dont l'inertie n'est jamais négligeable, et, quel que soit le type de machines employé, il faut prévoir que l'influence de ces organes va s'exercer en faisant disparaître ces variations continuelles dont chacune ne dure qu'un instant infiniment court, car elles n'ont pas la sensibilité nécessaire pour enregistrer aucune d'elles dans sa durée éphémère.

Il faut donc opérer directement sur la machine elle-même et enregistrer, si possible, sans intermédiaire interposé, les déformations qu'elle peut subir.

En dehors de cet enregistrement des efforts par les déformations élastiques du bâti qui constitue l'originalité de la machine de M. Frémont, nous n'avons rien de particulier à signaler dans les dispositions qu'elle présente.

Cette machine est actionnée à la main, ce qui permet d'en arrêter la marche à un instant quelconque, lorsqu'on veut étudier plus spécialement une période particulière du phénomène.

Ainsi qu'on le voit sur la figure 46, la traction s'opère par une vis dont l'écrou est entraîné par une série d'engrenages amplifiant l'effort développé.

Cet écrou est disposé, d'autre part, avec roulement sur billes, de façon à diminuer le frottement correspondant.

L'effort développé est mesuré d'ailleurs par la romaine dont la machine est munie, ce qui permet de contrôler à chaque instant les indications de l'enregistreur.

En examinant le bâti de la machine, on voit qu'il présente une forme en C bien dégagée qui a été adoptée précisément pour faciliter l'inscription des déformations élastiques.

Sous l'effort de tension qu'elle subit, l'éprouvette tend à rapprocher les deux branches du C, et ce déplacement a pour effet d'entraîner le petit bras d'un levier coudé qui appuie continuellement sur l'une des branches du C, le grand bras du devier se déplace immédiatement et il vient inscrire sur le tableau enregistreur, rattaché à l'autre branche du C, une ordonnée amplifiée, proportionnelle au rapprochement des deux branches.

L'inscription de l'allongement est obtenue d'après le procédé habituel des appareils enregistreurs en disposant sur l'éprouvette, aux extrémités de la longueur utile, deux colliers solidaires avec elle, dont l'un reste fixe et l'autre se déplace à mesure que l'éprouvette s'allonge; ce dernier entraîne dans son mouvement le tableau enregistreur, de sorte que la courbe obtenue donne les allongements en abscisses pendant que les ordonnées restent proportionnelles aux efforts développés.

POINÇONNEUSE D'ÉTUDE

La poinçonneuse qui a servi à nos dernières expériences est représentée en vue extérieure, figure 48, mais nous ne croyons pas devoir insister sur la description de cet appareil en raison des détails que nous avons donnés plus haut à ce sujet.

Ainsi que nous l'avons indiqué, elle est disposée de façon à permettre d'enregistrer les flexions du bâti qui servent à mesurer les efforts developpés, et, pour amplifier celles-ci dans la mesure du possible, on a employé l'acier coulé pour la construction, et l'on a donné au col de cygne une profondeur de 80 centimètres, ce qui a permis d'obtenir des déformations atteignant 1 millimètre pour un effort de 25 000 kilogrammes. Comme ces déformations sont amplifiées 50 fois par l'appareil enregistreur, on voit que l'ordonnée du diagramme représente un effort de 500 kilogrammes par millimètre. Quant à la course du piston, elle est enregistrée en abscisses et comptée en vraie grandeur, le tableau enregistreur étant entraîné directement par un fil rattaché au poinçon; mais, du reste, il serait facile d'amplifier cette course dans une proportion quelconque, si on le jugeait nécessaire. L'appareil est mû à la main, ce qui permettra de faire varier à volonté la vitesse d'enfoncement du poinçon, de l'arrêter même en un point quelconque de sa course. Cette disposition a paru indispensable pour permettre l'étude détaillée du phénomène, et, mieux, assurer peut-être l'exactitude du diagramme obtenu. Il faut considérer, en effet, que les poinçonneuses d'atelier, étant mues mécaniquement, effectuent toujours un poinçonnage rapide et sans arrêt, qui exclut par suite une observation détaillée. De plus, elles développent dans les premiers instants de l'opération, et de façon nécessairement brusque, une force vive importante qu'elles ont emmagasinée le plus souvent dans la période de repos qui a précédé, et il y a lieu de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

craindre dès lors que cette action brusque et instantanée ne contribue à fausser le diagramme obtenu.

Il est donc préférable, à tous égards, d'écarter les transmissions mécaniques et de commander la machine d'étude exclusivement à la main. Cette considération nous a déterminés à adopter un type d'appareil hydraulique actionné par une pompe à main. Celle-ci vient refouler l'eau dans les cylindres de la presse hydraulique et actionner le piston différentiel solidaire avec le poinçon.

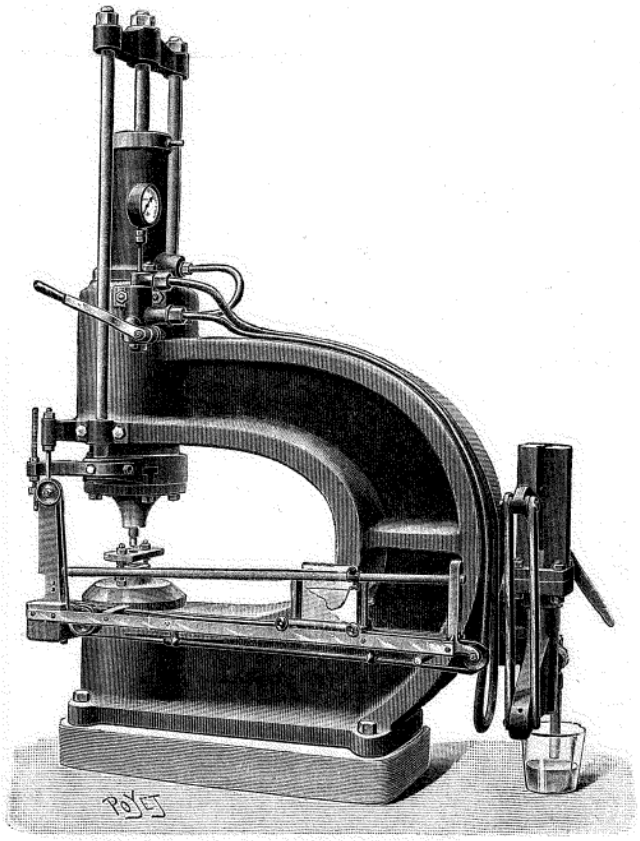


Fig. 48.

La pompe est munie d'un bras de levier de longueur variable permettant d'effectuer ce refoulement avec une vitesse variable à volonté, rapide quand l'effort est faible, ou ralenti s'il vient à s'accroître.

Une disposition de rappel permet d'ailleurs, par un simple mouvement de robinet, de relever rapidement le poinçon en admettant l'eau sous le piston de large surface qui occupe le grand cylindre.

Ainsi que nous l'avons indiqué précédemment, la pression exercée sur le piston différentiel peut atteindre 5 kilogrammes par centimètre carré, et, comme la surface effective de ce piston est de 620 centimètres carrés, on voit que l'effort développé peut atteindre 62 000 kilogrammes, permettant ainsi, comme on voit, de poinçonner des tôles d'assez forte épaisseur.

BACLÉ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III

LES ESSAIS DE TORSION

NOTE

Présentée par M. RATEAU

INGÉNIEUR DES MINES

Les essais de torsion ont fait l'objet d'un rapport de M. E. Polonceau, publié dans le tome III de l'ouvrage qui renferme les travaux de la Commission française des méthodes d'essai des matériaux de construction. Il est donc inutile de revenir sur les travaux résumés dans ce rapport. Je veux seulement appeler l'attention sur ce que les données que l'on a sur cette question présentent entre elles d'assez grandes divergences.

L'on admet généralement que le coefficient d'élasticité de glissement G de l'acier, coefficient qui intervient dans le phénomène de la torsion, est voisin de 8000 kilogrammes par millimètre carré, parce que, d'après des vues théoriques, il doit être égal, pour une substance isotrope, à 4/10 du coefficient d'élasticité de traction E qui est toujours, dans le cas de l'acier, peu différent de 20 000 kilogrammes par millimètre carré, et parce que, effectivement, d'après les observateurs qui ont étudié le sujet en tordant des barreaux cylindriques pleins, le rapport $\frac{G}{E}$ du premier coefficient au deuxième est compris entre 0,36 et 0,49, dont la moyenne, supérieure à 0,40, n'en est cependant pas éloignée.

Mais ces valeurs 0,36 et 0,49, trouvées pour limites de ce rapport, sont bien écartées l'une de l'autre, et même, d'après le capitaine Duguet, il faudrait descendre jusqu'à 0,35, ainsi qu'il le dit à la page 160 de la première partie de son ouvrage bien connu : *Limite d'élasticité et résistance à la rupture*, où il annonce qu'il a presque toujours trouvé au coefficient d'élasticité de glissement une valeur de 7000 kilogrammes par millimètre carré.

D'autre part, l'on admet encore que la limite d'élasticité du glissement simple est égale à 4/5 de la limite d'élasticité à la traction; mais, là aussi, il y a de grandes divergences dans les résultats donnés par les expérimentateurs.

Il paraît donc intéressant de reprendre expérimentalement la question de la torsion des barreaux cylindriques dans des conditions variées, en opérant d'ailleurs non seulement sur des cylindres pleins, mais aussi sur des cylindres creux, car on rencontre fréquemment dans l'industrie des arbres creux.

Il serait utile de savoir si vraiment les essais que l'on fait en opérant par traction sur des éprouvettes permettent de se rendre un compte exact des propriétés du métal à la torsion; si, autrement dit, il y a un rapport constant, ou à peu près constant, ainsi qu'on l'admet habituellement, entre les constantes de glissement (coefficient d'élasticité, limite d'élasticité, limite de rupture) et celles de traction; ou bien, au contraire, si les propriétés du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

métal dans son mode de travail par glissement sont, dans une certaine mesure, indépendantes de celles du travail par traction, auquel cas les indications des méthodes d'essai par traction ne permettraient pas d'apprécier avec exactitude les qualités d'un métal devant être soumis à la torsion.

J'ai eu l'occasion de faire, dans le courant de l'année dernière, un essai de torsion dans des conditions particulières d'exactitude sur un barreau d'acier à canon.

Voici comment cet essai a été fait.

Il s'agissait de tarer un dynamomètre de transmission à lectures optiques, composé d'un bout d'arbre cylindrique de 784 millimètres de longueur et $15^{mm},15$ de diamètre qui, au moyen d'un fourreau cylindrique disposé autour de lui, transmettait sa torsion à un miroir plan dont l'axe était perpendiculaire à celui de l'arbre. Une lentille projetait sur le miroir le faisceau lumineux issu d'un filament rectiligne de lampe à incandescence, et l'image du fil était reçue sur une échelle graduée en verre dépoli.

Une fois le tarage effectué, j'ai mesuré toutes les dimensions permettant de calculer les angles de torsion, et le résultat a été le suivant :

Sous un couple M de torsion de 8375 kilogrammètres, par exemple, l'angle de torsion de l'arbre était de $9°,10$. En calculant le coefficient d'élasticité G par la formule habituelle : $G = \frac{Ml}{\theta . I_p}$, on trouve 7997 kilogrammes par millimètre carré, c'est-à-dire presque exactement 8000 kilogrammes.

En résumé, je crois devoir émettre l'opinion qu'il est désirable que l'on entreprenne une série d'expériences de torsion systématiques et aussi exactes que possible sur divers barreaux cylindriques pleins ou creux et sur différents métaux, concurremment avec des essais de traction, dans le but d'étudier d'une manière approfondie les rapports qui existent entre les constantes relatives au travail du métal par torsion et glissement et celles relatives au travail par traction simple. Et, pour ces expériences, les méthodes d'observation par lectures optiques me paraissent tout particulièrement recommandables, car elles permettent d'atteindre une grande exactitude.

RATEAU.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

IV

RECHERCHES

SUR

LA RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

ENREGISTRÉE AUTOGRAPHIQUEMENT

AU MOYEN DE LA MACHINE A PENDULE AUTOGRAPHE

COMMUNICATION

Présentée par M. Robert H. THURSTON

DIRECTEUR DU COLLÈGE SIBLEY

Sur la demande des organisateurs du Congrès international des Méthodes d'essai des matériaux de construction, l'auteur éprouve le plus grand plaisir à présenter l'exposé qui suit de la méthode et de l'appareil qu'il emploie pour essayer les matériaux de construction, en y joignant quelques-uns des résultats de ses recherches.

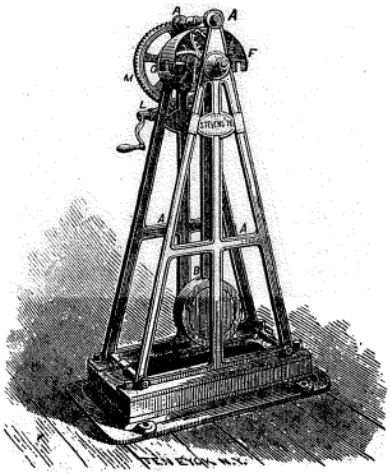


Fig. 1.

L'appareil se compose, comme on le voit dans la figure ci-jointe, d'un pendule, suspendu sur un axe convenablement disposé, dont le poids est placé à la partie inférieure, et muni, à la partie supérieure, d'une mâchoire permettant de saisir et de maintenir solidement une éprouvette placée suivant l'axe de suspension, de façon que l'effort tendant à faire tourner

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'éprouvette soit toujours contre-balancé par un moment mesuré exactement par celui du poids du pendule, par rapport à son axe de suspension. La force qui produit la rotation est appliquée à une mâchoire semblable, montée exactement dans le prolongement de la première et pouvant tourner sous l'action d'une vis sans fin, comme on le voit dans la figure 1. Quand on tourne la manivelle de ce dernier appareil, l'éprouvette est obligée de tourner, en surmontant la résistance que lui oppose le pendule; ce dernier constitue, ainsi, une résistance qui augmente continuellement. L'éprouvette cède également d'une façon constante et de plus en plus; la grandeur de sa déformation donne toujours la mesure de la force qui agit pour produire ce changement de forme, jusqu'à ce que la limite d'élasticité soit atteinte. A chaque instant, en dedans comme en dehors de la limite d'élasticité, le moment du pendule donne la mesure de la force qui agit, tandis que l'indication de la torsion correspondante est donnée par les positions angulaires relatives des deux mâchoires et des deux extrémités de l'éprouvette qu'elles tiennent. La machine est construite de façon à donner un diagramme des déformations à la torsion et des forces qui les produisent.

Sur l'extrémité supérieure du pendule est attaché un portecrayon, dont le crayon monte ou descend, suivant les oscillations du bras du pendule et d'une quantité proportionnelle à la grandeur du moment du poids suspendu; un guide, dans lequel le portecrayon se trouve engagé, est disposé à cet effet sur le bâti de la machine. Le frottement est réduit par l'emploi d'un rouleau au point de contact. Ce rouleau est fixé sur le portecrayon; sur la mâchoire opposée est monté un tambour fait d'une feuille de métal d'épaisseur et de largeur convenables dont l'axe coïncide avec celui de l'éprouvette. On fixe sur ce tambour une feuille de papier sur laquelle se meut une pointe de crayon. La rotation donne les abscisses, et le trait du crayon passant dans les courbes-guides donne des ordonnées correspondantes. On obtient ainsi une courbe, pour chaque expérience, dont les ordonnées donnent la représentation et la mesure des forces variables qui tordent et finalement cassent l'éprouvette, et les abscisses donnent la valeur des déformations correspondantes que ces forces font subir à l'éprouvette.

La machine donne ainsi une représentation autographique et exacte de l'histoire du travail accompli dans la rupture d'une éprouvette et donne le moyen de mesurer le module d'élasticité, la limite élastique, la loi de la variation de la résistance avec la déformation, et enfin la résistance finale et maximum, l'*allongement* final et le travail de la rupture. Elle donne enfin tous les caractères essentiels de la matière essayée de façon à fournir à l'ingénieur les données dont il a besoin pour ses calculs et l'établissement de ses dessins.

La représentation graphique de l'essai n'est pas une chose nouvelle : on trouve des exemples admirables de l'usage de diagrammes semblables dans l'ouvrage classique de Morin, *Résistance des Matériaux* (Paris, 1853). Ces relevés autographiques de mesures sont, croit-on, de l'invention de l'auteur, dont la revendication de priorité a été admise par les examinateurs du Bureau des inventions des États-Unis, et le brevet, qui a été accordé, protégeant les revendications, constitue un brevet fondamental dans cette classe des appareils enregistreurs autographiques.

La figure 1 de l'ouvrage classique de Morin est le diagramme « effort d'allongement », obtenu en cumulant les résultats de l'essai d'un échantillon de câble en fil de fer. Dans un cas les fils n'avaient pas été recuits, dans l'autre ils l'avaient été. Le premier diagramme autographique obtenu par la machine à essayer de l'auteur reproduit presque exactement la première de ces courbes, et les autres ont été produites ensuite à l'aide de matériaux de qualité semblable, même en ce qui concerne la curieuse dépression qui suit le moment où la limite élastique est dépassée. L'appareil a été immédiatement employé à des recherches sur les propriétés des matériaux de construction et a donné promptement des résultats justifiant les espérances de l'inventeur par la découverte de plusieurs phénomènes relatifs à la résistance et à la rupture des matériaux qui n'avaient pas été encore observés, bien qu'ils aient parfois été soupçonnés.

Avant que les résultats donnés par la machine autographique pussent être interprétés d'une façon satisfaisante, dans les conditions les plus ordinaires des méthodes d'essai usuelles, il était nécessaire d'étudier les relations données par l'expérience, entre les résistances à la torsion et à la traction, de noter et d'enregistrer les allongements et de trouver le moyen de déduire des diagrammes des conclusions relatives à la manière dont les matériaux se comportent quand ils sont employés dans les arts. Le premier travail, celui qui

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

consistait à noter les allongements des fibres à l'extérieur de l'éprouvette, pour en faire usage en cas de besoin, a été vite fait, et les tableaux suivants montrent les résultats obtenus. Les chiffres qu'ils contiennent représentent le tant pour cent d'allongement d'une ligne extérieure de fibre, primitivement parallèle à l'axe, mais formant, après cassure, une hélice dont les dimensions linéaires sont plus grandes que les génératrices du cylindre droit primitif. Ces chiffres sont surtout utiles pour déterminer l'allongement à la limite élastique ou dans son voisinage. Au delà de cette limite, on ne sait pas d'une façon certaine comment le métal se comporte.

La détermination des relations qui existent entre les résistances à la torsion et à la traction était une chose moins simple et il fallait de longues recherches pour déterminer, à la satisfaction de l'auteur, les valeurs des constantes nécessaires pour arriver à ce résultat. Dès le début de ces recherches, on découvrit que la relation cherchée n'était pas constante, comme on le croyait généralement, mais qu'elle variait avec la nature du métal, sa structure, les méthodes suivant lesquelles il avait été produit et les traitements qu'il avait subis au cours de sa préparation en vue de l'emploi dans les arts. On trouva immédiatement qu'un facteur constant ne pouvait être employé pour convertir d'une façon précise les résultats de l'essai enregistré autographiquement en chiffres donnant les résistances à la traction correspondante, mais qu'il fallait employer un facteur variant dans une certaine mesure avec les données chimiques et physiques de l'éprouvette. Des comparaisons approximatives d'essais à la torsion et d'essais à la traction, pour les fers communs, montraient que le facteur par lequel il fallait multiplier les lectures du diagramme autographique en pieds-livres, pour obtenir les valeurs correspondantes à la traction, était 250, à très peu de chose près. Les expériences de M. Dudley, à Altona, avec un appareil fourni au Pennsylvania Railroad pour le laboratoire mécanique de cette Compagnie, donnait un chiffre d'environ 5 pour 100 en moins pour les *aciers doux*, et l'auteur a remarqué que les métaux qui ont une ductilité extraordinaire quand on les essaie ainsi, donnent un excès apparent de résistance quand on les essaie à la torsion. Ces différences n'étaient pas grandes dans le cas de matériaux ductiles, mais étaient plus accentuées dans le cas de la fonte ou autre matière cassante.

Dans les recherches faites méthodiquement pour résoudre ces questions, on se procura une collection de 30 échantillons d'aciers divers, tous essayés à la traction, et les résultats de ces essais furent comparés avec les essais des mêmes métaux faits au moyen de la machine à enregistrement autographique[1].

Les aciers employés dans ces essais étaient classés par qualités, depuis les plus doux « ingot iron » jusqu'aux aciers à outils les plus durs employés dans la construction des machines-outils. Les expériences ont été faites pour l'auteur par M. W. R. Baird, qui a été l'un de ses aides les plus précieux. Comme l'auteur soupçonnait que le facteur cherché devait avoir une valeur variable et dépendant dans une certaine mesure de la nature du métal, les résultats des essais furent coordonnés de la façon suivante : les ordonnées obtenues en tirant une ligne dans la position moyenne des points enregistrés donnaient les valeurs du rapport cherché et les abscisses représentaient les valeurs de l'angle de torsion total de l'éprouvette[2]; ce diagramme est reproduit page suivante (fig. 2). On voit que le rapport cherché, c'est-à-dire le facteur de transformation, varie avec la qualité; il augmente avec la dureté et la résistance du métal et décroît quand la matière a plus de ductilité et moins de résistance. Dans toute la série expérimentée, les différences s'élèvent à 30 pour 100 environ de la valeur maximum. La ligne obtenue est supposée être une ligne droite, bien qu'une courbe s'écartant très peu de la ligne droite adoptée soit probablement plus exacte. Les équations obtenues pour les dimensions et proportions des éprouvettes adoptées, et dans le système de mesures actuellement en usage en Amérique, sont :

$$R = 30 - \frac{\theta}{3}; \quad T = T_1\left(300 - \frac{\theta}{3}\right).$$

Dans cette formule, R est le rapport cherché, T la résistance à la traction, et θ l'angle de torsion de l'éprouvette correspondant au point de résistance maxima.

1. Compte rendu de l'*American Society C. E.*, 18 juin 1878.
2. *Trans. A. S. C. E.*, t. VII, p. 172.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On verra que la théorie communément acceptée donne des relations qui ne sont pas seulement incorrectes, mais qui, pour les cas extrêmes des substances parfaitement ductiles et de celles qui ne le sont pas du tout, sont précisément le contraire de ce qu'on a trouvé dans les recherches ci-dessus. La valeur du rapport pour les métaux cassants, dans les mêmes conditions, est 188 suivant la théorie, et pour les substances ductiles 250; les métaux non ductiles donnent les chiffres les plus élevés; on doit observer en outre qu'une substance cassante comme la fonte peut donner, pour ce rapport, une valeur égale à celle indiquée par la théorie comme appartenant aux métaux ductiles, tandis que la classe des métaux

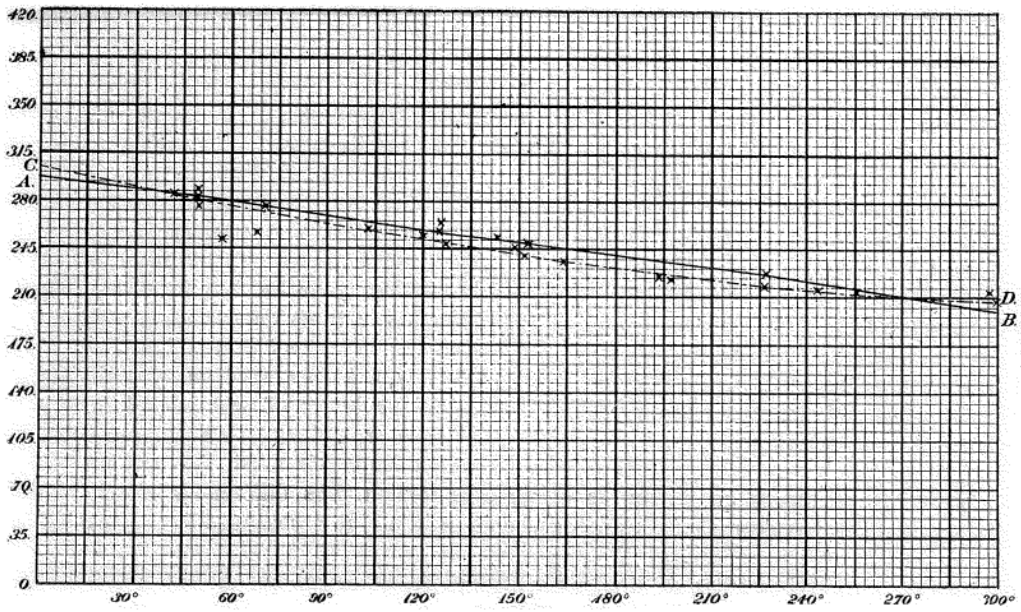


Fig 2

ductiles, représentée par des aciers de toute sorte capables de subir une torsion sans se rompre, peut donner des valeurs du même rapport dépassant celles qu'on obtient pour les autres classes de métaux, ce qui renverse la relation qu'on avait cru voir théoriquement. Les valeurs exactes de ces rapports et facteurs constants et leurs variations avec la qualité du métal employé doivent évidemment varier, numériquement, avec les dimensions et les proportions de l'éprouvette; mais leur nature et la loi générale du changement avec le caractère du métal sera certainement la même dans tous les cas. Les faits mis en évidence par ces recherches paraîtraient devoir nécessairement servir de base, tôt ou tard, à une nouvelle théorie de la résistance des matériaux.

A l'occasion du meeting de la *National Academy of Science of the United States*, en novembre 1873, cette machine a été montrée aux membres de cette Société; on l'a fait fonctionner devant eux, et cette exhibition est devenue le point de départ d'une découverte de première importance en ce qui concerne les recherches scientifiques. La machine a été laissée, à la fin de l'exhibition, avec une éprouvette en place et sous une charge considérable. Le but qu'on se proposait était d'étudier la viscosité du métal et d'obtenir un enregistrement autographique. Au bout de 24 heures, on trouva que le métal — fer forgé — n'avait pas cédé de la plus petite quantité, et n'avait, en apparence, perdu aucune partie de sa faculté de porter une charge. En augmentant la charge lentement et d'une façon continue, la courbe enregistrée changea immédiatement de direction : la ligne s'éleva tout d'un coup à un niveau supérieur et la courbe reprit une forme semblable à la forme habituelle, c'est-à-dire celle de la courbe primitive et le métal cassa finalement avec une résistance plus grande et une moins grande ductilité que celles qu'on eût évidemment obtenues si l'essai avait été achevé sans interruption le jour précédent, et qu'ont données d'autres éprouvettes cassées postérieurement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La découverte de « l'augmentation des conditions normales des limites d'élasticité par l'application d'une charge » fit l'objet d'une communication à la Société américaine des Ingénieurs civils dans la séance ordinaire du 19 novembre 1873 (voir pour les détails le bulletin de cette association). On montra ainsi, et les ouvrages postérieurs de l'auteur et de beaucoup d'autres expérimentateurs ont confirmé cette conclusion, que quelques métaux, au moins, comprenant les fers forgés et les aciers, et probablement quelques alliages, ont la singulière propriété, non seulement de porter une charge supérieure à la limite d'élasticité sans céder, mais même de subir une élévation de la limite d'élasticité sous certaines charges. Des recherches ultérieures ont aussi montré qu'avec le temps cette élévation de la limite d'élasticité normale, pour une torsion donnée inférieure à la rupture, est susceptible d'un lent accroissement. L'accroissement, très rapide au début, s'affaiblit très vite, et vers la fin on ne peut le percevoir qu'en se livrant à des observations de grande précision. Cette augmentation progressive de la limite d'élasticité sous des torsions importantes peut, cependant, continuer à se produire pendant des mois sous la charge. Pour du bon fer de pont et des fers de câbles comme ceux dont on a fait régulièrement usage dans la marine des États-Unis la loi est assez bien représentée par l'expression

$$E' = 5 \log T + 1{,}5\ \%$$

dans laquelle le tant pour cent d'augmentation au-dessus du chiffre primitif est représenté par E', T étant le temps de repos en heures, ne dépassant pas un jour ou deux[1]. Les métaux qui jouissent de cette propriété ont été appelés par l'auteur « métaux de la catégorie du fer », les autres «métaux de la catégorie de l'étain »; la dernière catégorie montrant plus ou moins de viscosité sous toutes les charges et n'ayant pas de limite d'élasticité définie sous l'action de charges croissant d'une façon continue.

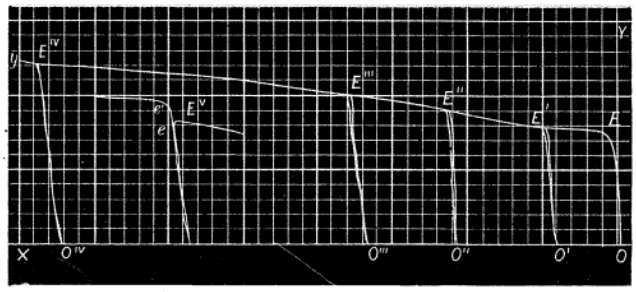


Fig. 3.

Dans la figure 3, qui est une copie de l'un de ces diagrammes autographes, on voit que E est la limite d'élasticité primitive et que les points successifs de la partie continue de la courbe correspondent à la série normale des limites d'élasticité, les temps d'interruption en E' E'' E''', étant trop courts pour altérer visiblement l'allure de la courbe. Les charges en ces points sont respectivement 14 kilogrammes par millimètre carré, 14^{kg},70, 15^{kg},55 et 17^{kg},50. Les allongements sont pour les points spécifiés : 1,25, 2,53, 4,50 et 6,78 % de la longueur primitive. Si la charge avait été suspendue pendant un temps un peu considérable, comme en E', la limite d'élasticité normale aurait été augmentée considérablement comme on le voit, en *e* et *e'*.

Une autre découverte importante résultant de ces recherches a été le fait que toute pièce d'une construction en fer ou acier porte d'une façon permanente la marque et la preuve de la grandeur des plus fortes charges qu'elle a supportées en excès de sa limite d'élasticité. Quand on l'emploie dans une construction, les fatigues résultant du passage au laminoir sont enregistrées sur la pièce; plus tard, les charges donnant une fatigue supérieure à celles du laminoir, imposées intentionnellement ou accidentellement, laissent par contre des marques permanentes sur les pièces et, finalement, si elles sont cassées par accident ou autrement,

1. *Transactions de l'Am. Soc. C. E.*, t. II et VII, 1874, 1878.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'enregistreur automatique montre que le dernier enregistrement de leur structure moléculaire donne la mesure de la dernière charge qu'ils ont supportée et correspond à ce chiffre. Le grand nombre de recherches qui ont suivi celles auxquelles on fait allusion ici ont montré que ce principe est vrai quelle que soit la manière dont la charge est appliquée et que le fait est aussi vrai pour les efforts longitudinaux, transversaux ou à la torsion. Ainsi une pièce qui a supporté une charge trop forte porte la preuve de ce fait, et cette preuve ne peut être détruite que par une charge supérieure à celle qui a été ainsi enregistrée. Elle n'est même pas détruite par un recuit modéré. Il faut une température élevée et un nouveau travail du métal pour effacer complètement ce témoignage et cet enregistrement historique.

Il est évident que « cette élévation des conditions normales des limites d'élasticité » est un phénomène nettement différent du phénomène bien connu de l'accroissement de la limite d'élasticité par suite d'un accroissement de la torsion sous des charges croissantes, c'est-à-dire les séries normales des limites élastiques montrées si admirablement dans les ouvrages du général Morin et reproduites dans les ouvrages de ses successeurs.

L'enregistrement conservé dans la structure d'une pièce de toute construction surchargée, comme un pont, peut évidemment être utile pour révéler le point faible, la cause primitive de l'accident et la responsabilité engagée[1]. En pareil cas, on doit trouver que la limite d'élasticité anormale et enregistrée augmente progressivement de valeur depuis la partie du pont qui est la moins éprouvée jusqu'à celle qui est la plus déformée par une charge excessive, et la première pièce qui cassera se trouvera au point où se trouvera la plus grande augmentation de la limite d'élasticité ou dans le voisinage de ce point. C'est par ces procédés de recherches que l'auteur a pu confirmer le témoignage qui tendait à prouver qu'un accident de pont, en 1878, était dû à une fatigue exceptionnelle provenant d'un choc à l'endroit où un essieu s'était rompu. La limite d'élasticité normale et primitive du métal était d'environ 12,00 kilogrammes par millimètre carré. La limite d'élasticité de la pièce surchargée augmentait graduellement mais assez irrégulièrement jusqu'à 20,00 en approchant du point où le choc avait eu lieu. La résistance primitive du métal était de 35,00 environ. Elle avait augmenté d'environ 38,00. La limite d'élasticité était doublée et la résistance à la rupture augmentée de 10 %. C'est ainsi que les causes d'accidents survenus à des constructions ou des machines peuvent quelquefois être découvertes, tandis qu'elles resteraient sans cela enveloppées de mystère, comme c'est trop souvent le cas pour les explosions de chaudières.

Comme autre exemple des principes et phénomènes décrits, nous avons les communications suivantes qui ont été faites ultérieurement sur ce sujet par le professeur Bissell[2]:

Pour la commodité, les différentes séries ont été désignées par les lettres A, B, C, D, et les éprouvettes ont été numérotées de 1 à 16.

Le métal employé dans tous ces essais était de l'acier qualité machine (0.5 C.).

1. **Série A.** — Quatre éprouvettes de 3/4 de pouce de diamètre et de 14 pouces de longueur ont été préparées en ménageant un collet de 1/2 pouce de diamètre et de 2 pouces de long au milieu de la longueur de chacune d'elles. Une éprouvette était essayée à la traction jusqu'à ce qu'une déformation bien prononcée se fût produite. Une seconde pièce était courbée dans le collet, redressée, puis courbée et redressée dans un plan formant un angle droit avec celui du premier pliage.

Une troisième éprouvette était tordue en avant et en arrière entre les pointes d'un tour (les extrémités étant fixées au plateau et à la poupée, la force donnée par la courroie tordait l'éprouvette). La quatrième éprouvette était comprimée jusqu'à ce qu'il se produisît une déformation appréciable du collet.

Ce collet servait dans tous les cas à localiser les fatigues.

1. Sur une nouvelle méthode pour découvrir les charges excessives imposées au fer, etc. *Transactions A.S.C.E.*, t. VIII, mars 1878, n° 156.

2. *Transactions Am. Soc. C. E.*, t. XXIV, mars 1891, p. 159.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les quatre éprouvettes étaient alors tournées à un diamètre exactement uniforme, un peu moindre que celui de la section fatiguée, sur une longueur de 10 pouces. Finalement, les quatre pièces étaient essayées à la traction jusqu'à la formation d'une striction bien nette.

On observa alors (voir les nos 1-4) que la portion fatiguée antérieurement était dans chaque cas d'un diamètre notablement plus grand que toute autre partie de l'éprouvette, la striction se formant vers une extrémité, ce qui montre que la partie fatiguée possédait une plus grande résistance à la traction et une moins grande ductilité (voir fig. 4).

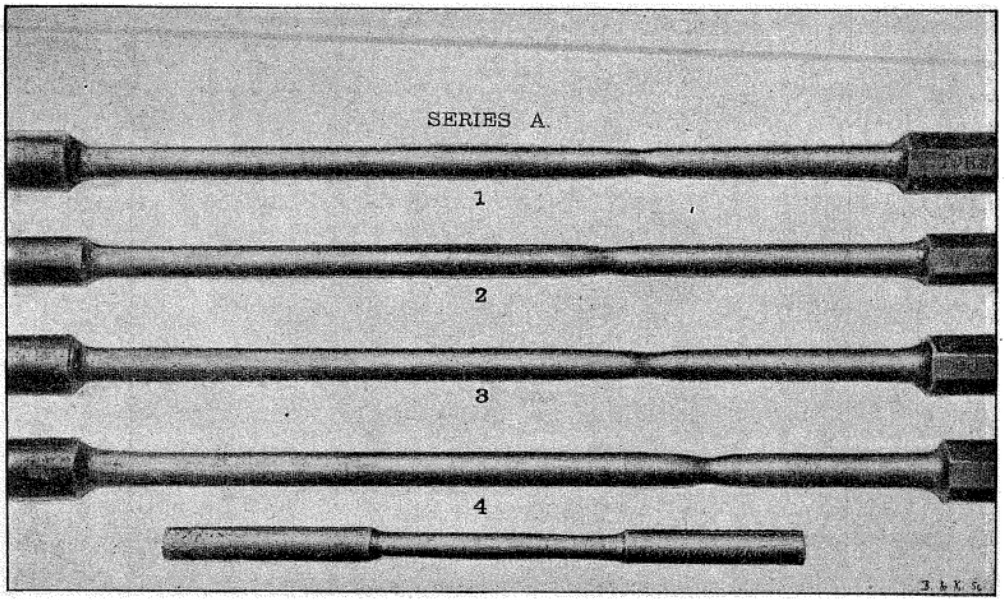


Fig. 4.

2. **Série B.** — On employait cinq éprouvettes de torsion. L'une tournée à la dimension-type était cassée avec la machine Thurston autographique en prenant un diagramme.

Une autre était faite avec des extrémités extrêmement longues et tournée à 3/4 de pouce de diamètre en son milieu et à 3/8 entre les têtes. Cette éprouvette était essayée à la traction jusqu'à ce qu'une déformation bien nette se fût produite. Les trois autres éprouvettes, ramenées au tour au diamètre de 3/4 de pouce en leur milieu sur 3/8 de pouce de longueur, étaient soumises à des efforts importants de compression, de torsion et de traction, donnant dans chaque cas une déformation permanente.

Les quatre éprouvettes, converties ensuite en éprouvettes-types pour la torsion, étaient essayées à la rupture à la machine autographique, les diagrammes étaient tracés sur les feuilles qui avaient servi pour les premiers essais des mêmes éprouvettes. Les courbes ont montré un accroissement de résistance et une diminution de ductilité, et les éprouvettes, attaquées pour que la disposition des fibres devînt apparente, montraient chacune des hélices de pas différents; le pas était le plus oblique sur les parties qui n'avaient été soumises qu'une fois à l'effort, et le moins oblique sur la partie déjà éprouvée. Le pas était proportionnel à la ductilité. Nous voyons immédiatement l'effet du traitement sur cette propriété du métal (fig. 5).

Le phénomène est plus marqué dans les nos 1 et 5 qui ont été à l'origine éprouvés à la compression et à la flexion respectivement, mais il est néanmoins apparent dans les autres cas.

3. **Série C.** — Quatre pièces de 4 pouces de longueur sur 5/8 de pouce de diamètre ont été préparées en tournant chacune vers le milieu au diamètre de 7/16 de pouce sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une longueur de 3/16 de pouce. Ces pièces ont été soumises à un effort important de traction, compression, torsion et flexion respectivement, et dans chacune on a coupé une éprouvette de compression de 3/4 de pouce de longueur sur 3/8 de pouce de diamètre, de façon à placer la partie fatiguée au milieu de la longueur. Ces éprouvettes ont été

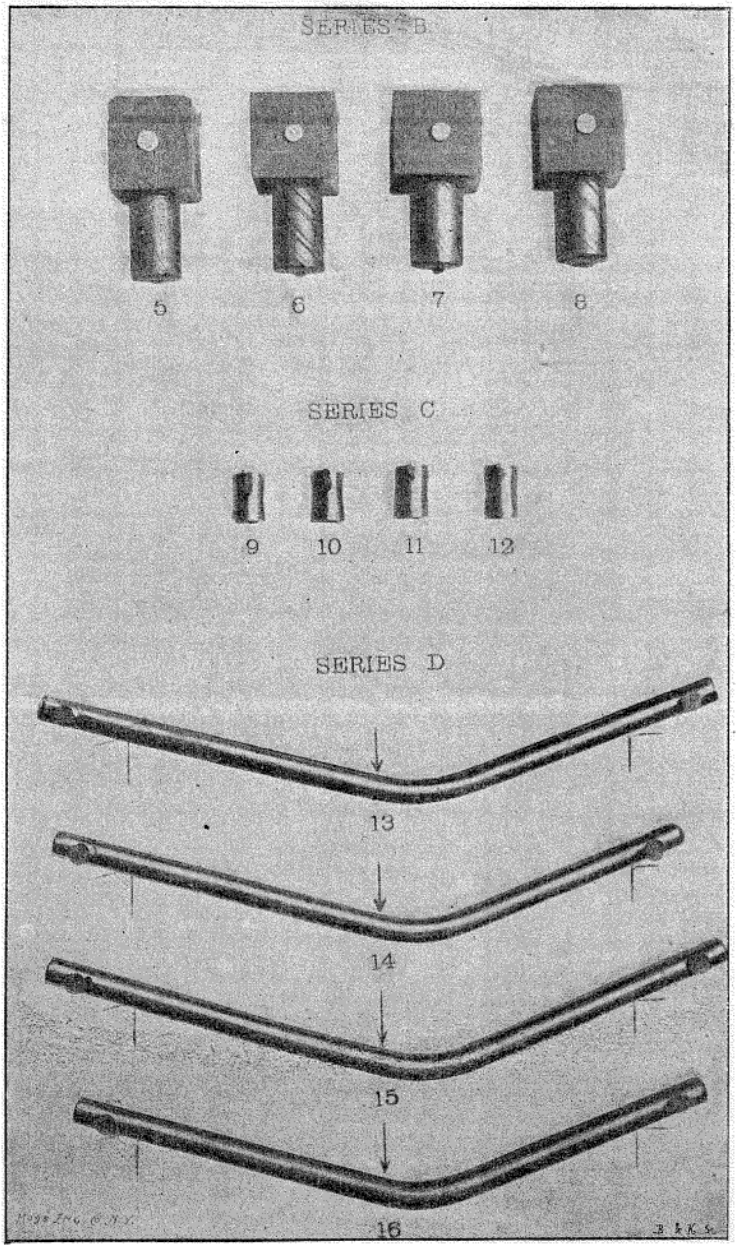


Fig. 5.

finalement soumises à de grands efforts de compression et il en est résulté pour toutes les éprouvettes (nos 9-12) les mêmes effets intéressants, savoir un beaucoup plus grand diamètre aux extrémités qu'au milieu. La pièce tendait à prendre la forme d'un sablier (fig. 5).

Ce résultat montre que la résistance était plus grande et la ductilité moins grande dans les parties soumises primitivement à des efforts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

4. **Série D.** — Quatre barres de 8 pouces de long et de 5/4 de pouce de diamètre ont été centrées, et dans chacune un collet de 1 pouce de long sur 7/16 de pouce de diamètre a été tourné, ce dernier étant placé entièrement du même côté par rapport au milieu, c'est-à-dire à 4 pouces d'une extrémité et à 3 pouces de l'autre.

Un autre résultat extrêmement important de ces recherches, dans lesquelles le métal disait son histoire et montrait ses propriétés caractéristiques normales ou anormales, consiste dans la découverte de la constance de la forme générale du diagramme d'un même métal d'une qualité donnée, cette forme variant toujours avec la qualité, de façon à montrer dans toutes ses parties, du commencement à la fin, les caractéristiques du métal de l'éprouvette. Une éprouvette saine de bon fer donne toujours le même diagramme que toute autre éprouvette saine de métal de la même qualité, et les diagrammes caractéristiques de différents fers et aciers montrent à l'expérimentateur exercé leur caractère précis; même si la première partie du diagramme était seule donnée, la qualité du métal étant connue d'une façon générale, cette première partie permettrait de répondre à toute question relative à la présence ou à l'absence de défauts dans la pièce ou à la possibilité de la fourniture d'une qualité différente de celle demandée par la spécification. Le diagramme étant obtenu depuis le commencement jusqu'à la limite d'élasticité ou un peu plus loin, la caractéristique de l'éprouvette se trouve suffisamment connue, et ce diagramme, conservé d'une façon permanente, constituerait toujours une preuve des caractères et de la qualité de la pièce introduite dans la construction. Il en résulte — et ceci est le point principal — qu'il est parfaitement pratique d'essayer toute partie ou pièce d'une construction, telles qu'une entretoise, un poinçon, une poutre, que l'on doit introduire dans un pont ou dans une autre construction, et de déterminer la façon dont elle répond au cahier des charges sous ce rapport, et enfin, de voir s'il est sage de l'introduire dans la construction et de l'employer pour l'usage auquel elle a été destinée, cette pièce n'étant pas détériorée par une fatigue n'excédant pas d'une façon importante la limite d'élasticité; cela permet en même temps de conserver un procès-verbal donnant autographiquement le témoignage de la qualité, témoignage auquel on peut se reporter si un accident ou autre circonstance rend ce témoignage utile. La série complète de ces diagrammes pour une construction quelconque constituerait un témoignage permanent des conditions primitives de la construction et une preuve qu'elle donnait à l'origine confiance et sécurité, sous les charges qu'elle devait supporter, et montrerait que tout accident subséquent ayant amené la destruction doit être attribué à d'autres causes qu'à une mauvaise construction ou à l'emploi de mauvais matériaux. Dans un pont armé, par exemple, il serait possible de construire le tout au moyen de parties dont chacune aurait été essayée et reconnue bonne avant son introduction, ce qui permettrait d'affirmer que la construction complète, si les dessins en ont été bien établis, est absolument digne de confiance sous la charge maxima projetée. La méthode actuelle consistant à essayer des éprouvettes et à introduire dans la construction des pièces qui n'ont pas été essayées ne donne certainement pas une assurance absolue de sécurité, bien qu'elle constitue un grand perfectionnement sur l'ancien système dans lequel on supposait qu'aucune pièce n'avait de défaut et dans lequel on basait les calculs sur la supposition que chaque pièce avait la qualité de la classe à laquelle elle appartenait et que le « facteur de sécurité » était suffisant pour couvrir les risques d'accident. La proposition que l'auteur fit au moment où il s'occupait de ces recherches était que toute construction fût faite de pièces essayées et que les diagrammes des différentes parties montrant leurs caractéristiques jusqu'à la limite élastique et un peu au delà fussent conservés. Dans l'intervalle, on a montré clairement que les fers et aciers qu'il convient d'employer dans les constructions et dans les machines, quand on les a reconnus assez forts pour l'usage qu'on doit en faire, ne perdent pas leurs propriétés de résistance sous les charges pour lesquelles ils ont été calculés, mais, au contraire, gagnent plutôt en résistance sous l'action de la charge et, s'ils ne sont pas détériorés par la corrosion ou l'usure, donnent une plus grande sécurité à mesure que le temps s'écoule. Ceci n'est pas, d'ailleurs, vrai, quand la charge atteint la déformation permanente, c'est-à-dire est supérieure à la limite d'élasticité suivant toute probabilité.

Le cuivre, l'étain et d'autres métaux de nature ductile et n'ayant pas de limite d'élas-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ticité distincte, se conduisent, d'après les découvertes qui ont été faites, bien différemment suivant les cas. Tandis qu'on a trouvé des alliages qui se comportent comme les métaux de la catégorie du fer, ces métaux cèdent généralement d'une façon continue sous toute charge produisant l'écoulement, et, avec le temps, casseraient sous une charge bien inférieure à celle qui serait nécessaire pour les casser à la façon habituelle avec une machine à essayer en augmentant régulièrement la charge. Avec ces métaux, il n'y a pas non plus de « recul de la limite d'élasticité normale » ni de limite d'élasticité produite artificiellement quand on les soumet aux mêmes traitements que les métaux de la classe du fer. On a conclu de là, en conséquence, que cette classe de métaux donne moins de sécurité dans les constructions que les fers et les aciers et que le fait qu'un essai a donné une certaine charge de rupture ne prouve pas que la charge peut être supportée indéfiniment. Au contraire, une construction comportant des pièces de cette nature pourrait finir par tomber sous l'action de charges bien moins considérables que celles de l'essai. Les métaux de la classe du cuivre et de l'étain, et ceux de leurs alliages qui ont les mêmes caractéristiques, ne sont donc pas à rechercher pour les constructions où de grandes charges sont supportées d'une façon permanente; personne ne peut dire exactement à quel point on s'expose en en faisant usage. Cette déduction n'est pas applicable au cas où le métal est soutenu et où son écoulement est impossible. On ne sait pas encore quelle est la fraction de la charge de rupture trouvée aux essais qu'on peut imposer avec sécurité à ces métaux. Les expériences de l'auteur sur le fil de fer montrent que le métal recuit, qui se rapproche le plus par ses propriétés de la catégorie du cuivre et de l'étain, cassera au bout d'un certain temps, jours, mois ou années, suivant les cas, sous l'action d'une charge constante approchant de la moitié de la charge de rupture à la machine à essayer; tandis que du fil écroui et des fers marchands porteront leur charge entière jusqu'à ce qu'ils soient affaiblis par l'oxydation ou l'usure[1]. Il aurait dû être dit plus haut que les fers doux recuits ne présentent pas la même sécurité que les métaux ordinaires non recuits. Dans le cas de la catégorie du cuivre, de l'étain et de leurs alliages, l'auteur a trouvé qu'ils cassent sous des charges de 25 à 30 % moindres que celles qui sont données par la machine à essayer, et que les pièces faites de ces métaux se déforment aussi davantage sous des charges proportionnelles que les pièces de fer ou d'acier.

Ainsi, comme l'auteur l'a fait remarquer dans ses premiers rapports sur les résultats de ses recherches, au sujet des métaux à employer par les ingénieurs dans la construction des œuvres importantes :

« Dans la détermination de la valeur des matériaux de construction, il est habituellement plus utile de vérifier la position de la limite d'élasticité et la façon dont le métal se conduit avant d'atteindre cette limite, que de déterminer l'effort de rupture, ou exceptionnellement peut-être, pour les machines, le commencement de la déformation. On commence à reconnaître qu'il serait possible d'essayer toute pièce de métal qui entre dans une construction importante, et de l'*employer ensuite* en sachant qu'elle a prouvé qu'elle était capable de porter une charge avec une marge de sécurité suffisante et connue. La méthode ici décrite (emploi de la machine à essayer autographique) permet de le faire avec une sécurité complète. La limite d'élasticité se produit dans les deux ou trois premiers degrés, et, comme on le voit, l'éprouvette-type peut être tordue 100 fois et même 200 fois de la même quantité sans atteindre seulement sa résistance maximum, et souvent bien plus que cela avant que la rupture commence. On peut donc, en parfaite sécurité, essayer une pièce de pont jusqu'à la limite d'élasticité, puis la mettre dans la construction avec la certitude que son aptitude à porter une charge sans être détériorée a été déterminée, et que des résistances internes existant précédemment ont été éliminées. L'enregistrement autographique de l'essai pourrait être conservé et produit à un moment quelconque en justice comme pièce de conviction, — comme on produit le « diagramme pris à l'indicateur » d'une machine à vapeur, — si la responsabilité du constructeur se trouvait mise en cause au sujet d'un accident, ou comme témoignage de bonne foi dans l'accomplissement de son contrat. »

1. *Trans. A. S. C. F.*, t. V, 6 déc. 1876; t. VII, Mch. 20, 1878.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous voyons maintenant qu'il y a là, pour l'ingénieur, un vaste et important champ d'études, et que les connaissances qu'on peut acquérir par l'étude des caractéristiques des métaux employés dans la construction, telles qu'elles sont révélées par la manière dont ils se comportent, loin de la rupture finale ou même du commencement de cette rupture données par le diagramme des déformations, peuvent avoir pour lui la plus grande utilité là où l'économie ou la sécurité sont de première importance.

Le sujet ne fait que commencer à attirer l'attention méritée par son importance, mais on doit s'attendre à voir ce mouvement s'accentuer et à voir les ingénieurs faire une application journalière de faits qui sont maintenant découverts et de méthodes qui leur sont déjà familières.

Étendant ces recherches à l'étude des bois, on a trouvé qu'ils se comportent d'une façon très semblable aux métaux les plus mous et les moins élastiques; en recommençant avec eux les recherches sur la façon dont ils se comportent sous un effort soutenu, on a trouvé qu'eux aussi étaient susceptibles de se casser sous des efforts très inférieurs à ceux qu'ils supportaient dans les essais ordinaires à la machine à essayer, dans lesquels la torsion était augmentée graduellement jusqu'au point de résistance maximum. Par exemple, une pièce de « yellow pine » chargée de 60 % seulement de la charge indiquée comme étant sa charge de rupture dans les essais ordinaires cède lentement et continuellement jusqu'à ce que, après une période de 15 mois, elle finisse par casser. L'auteur finit donc par arriver à la conclusion qu'un prétendu « facteur de sécurité » de deux, pour les métaux de la « catégorie de l'étain » et pour les bois, n'est pratiquement qu'un facteur égal à l'unité, et que, en étudiant des constructions quelconques, dans lesquelles on emploie ces matériaux, on devrait admettre que l'effort maximum, pour une charge permanente, ne peut dépasser la moitié de ce qui est trouvé à la machine à essayer par le receveur des matières [1].

Ce sujet est évidemment d'une très grande importance et l'on ne peut pas en pénétrer trop profondément les ingénieurs qui font ces études. Ils ne peuvent aussi apporter trop de soins à se rendre compte de la catégorie à laquelle appartiennent les matériaux qu'ils doivent employer dans une construction, et à rechercher une qualité de métal qui soit exempte de ces défaillances lentes et insidieuses qui caractérisent les matières les plus tendres qui se trouvent sur le marché et qui sont d'un usage général. Quand on emploie ces matériaux, la conclusion évidente est que le facteur de sécurité doit être doublé, pour cette catégorie, relativement à celui adopté pour la catégorie du fer; on doit entendre par là, non pas tous les fers, pas les fers recuits, par exemple, mais ces fers qui ont une limite d'élasticité normale très prononcée et dont la résistance croît avec le temps et la charge; on doit, de plus, conclure que la limite d'élasticité est la base naturelle du calcul pour les matériaux convenant aux constructions de machines et aux constructions importantes lourdement chargées, et que la variation de la limite d'élasticité avec la composition, ainsi que la variation qui a été décrite ici, doit être soigneusement étudiée et mesurée.

La variation de la limite d'élasticité n'est pas seulement produite dans les fers et les aciers non recuits par un effort direct, mais toute charge augmentant la limite d'élasticité produit cet effet dans toutes les directions, de façon qu'une variation due à des efforts transversaux dépassant la limite d'élasticité augmente la limite d'élasticité à la traction, et que l'essai d'une éprouvette à la traction augmente sa résistance à la compression, à la torsion et à la flexion; réciproquement, chaque forme d'essai ou de fatigue produit les mêmes effets sur la limite d'élasticité ou les séries de limite d'élasticité de l'un quelconque des autres essais. Le résultat donné par les études faites dans cet ordre d'idées a été annoncé, par l'auteur, à la Société américaine des « Civil Engineers » en 1880; il est consigné dans les Comptes rendus de cette Société, avec des figures montrant l'effet de ce traitement sur une barre de fer soumise à un effort transversal et dont la résistance à la traction a été trouvée augmentée. La valeur de l'accroissement, dans cette circonstance, a été de 30 à 50 % de la résistance normale donnée par le diagramme ordinaire « résistance, allongement » de la machine à essayer, élévation de la limite d'élasticité qu'on peut considérer comme très importante. L'accroissement moyen de la limite d'élasticité primitive a été trouvé, dans ce cas, de 16 à 20 kilogrammes par millimètre carré (23 000 à 30 000 livres par pouce carré

1. *Materials of Engineering*, N. Y., J. Wiley and Sons, t. I, 130, pp. 114-118.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

approximativement), soit une augmentation de 25 %. Des expériences ultérieures ont montré que chacune des épreuves habituelles produisait des résultats semblables. La résistance totale, dans ce cas, aussi, n'était pas modifiée d'une façon appréciable. La compression latérale, dans un cas, a augmenté la limite d'élasticité dans le sens longitudinal de 100 %, augmenté le module d'élasticité de 4 %, et diminué la ductilité de 60 %. Des résultats semblables, donnés par la compression latérale, ont été observés en essayant ensuite l'éprouvette à la flexion.

Il résulte de là que l'ingénieur peut artificiellement produire une augmentation de raideur, s'il le désire, en faisant usage de toute méthode convenable pour l'obtention d'une fatigue dépassant la limite d'élasticité primitive, et cela a été fait quelquefois dans la pratique. L'augmentation de raideur et l'élévation de la limite d'élasticité, produites ainsi, peuvent être considérées comme permanentes et ineffaçables, et une construction raidie par l'emploi de métal de qualité convenable, ainsi traité, restera pendant toute son existence sans éprouver de changement sous l'influence de fatigues moins importantes.

Enfin, des recherches sur les caractéristiques des alliages ont été faites sur une grande échelle en faisant usage du même appareil. Les plus importantes ont été faites sous la direction de l'auteur, alors membre de la Commission des États-Unis, chargée des essais du fer, de l'acier et autres métaux; leurs résultats ont été publiés dans les rapports de cette Commission. Avant de commencer les recherches, cependant, il était nécessaire de trouver une méthode de représentation des résultats de l'essai et un plan de travail exigeant le minimum de temps et de peine, et assurant la mise en évidence la plus complète des qualités à déterminer et des relations à étudier. La méthode imaginée par l'auteur dans ce but est maintenant familière à toutes les personnes qui ont étudié ces questions. Elle a fait l'objet d'une communication à l'Association américaine pour l'avancement des sciences, à la réunion de 1877; elle fut choisie par l'auteur, alors vice-président puis président de la section scientifique de l'Association, comme sujet de discours d'ouverture. En adoptant un système de représentation plutôt *glyptique* que graphique, il fut possible de faire embrasser d'un coup d'œil toutes les ténacités, par exemple, du nombre infini de compositions possibles des alliages ternaires et, en même temps, les caractéristiques des trois familles d'alliages binaires constituant les limites de ce champ; et cela, en groupant en un modèle, sorte de carte en relief, les résultats des essais à la torsion, à la traction ou autres; la résistance de tous les alliages possibles, du cuivre, de l'étain et du zinc; tous les alliages cuivre-étain et tous les alliages cuivre-étain-zinc, et tous les mélanges de zinc et d'étain. L'emploi d'alliages choisis systématiquement, représentés sur le modèle par des points uniformément répartis, donnait les renseignements demandés pour la détermination des caractéristiques du nombre infini des compositions possibles. Environ 40 alliages, échelonnés régulièrement, formaient la base des premières recherches, et la machine autographique a fourni les résultats qui ont servi à la première révélation de la loi donnant les relations entre les variations de résistance et autres propriétés de ces matériaux et les variations de composition, pour tout l'ensemble. Le principe du système de représentation par carte en relief, tel qu'il a été exposé alors à l'A. S. C. E.[1], était le suivant :

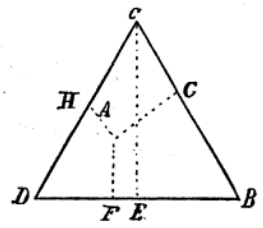


Fig. 6.

Dans un triangle, d'un point A (fig. 6), abaissons une perpendiculaire sur les trois côtés égaux. L'aire totale du triangle BCD est mesurée par le produit de la hauteur CE par la

1. *On a new method of planning Researches*; *Proc. Am. Assoc. for ad. of Sci.*, Nashville Meeting, 1897; t. XXVI, p. 114.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moitié de la base BD. Menons les droites AB, AC, AD; nous formons ainsi trois triangles plus petits dont la somme est égale, en surface, au triangle primitif. Nous avons

$$CE \times 1/2\,ED = AF \times 1/2\,BD + AG \times 1/2\,BC + AH \times 1/2\,CD;$$

ou, les côtés du triangle étant égaux,

$$CF \times 1/2\,BD = (AF + AG + AH)\,1/2\,BD.$$

D'où

$$AF + AG + AH = CE.$$

L'aire du triangle total peut être considérée comme représentant un alliage ternaire composé des trois métaux dans les proportions représentées par les aires des trois petits triangles qui forment ensemble l'aire totale. Mais ces petits triangles ont des aires proportionnelles, comme on l'a vu, à leur hauteur AF, AG, AH. Les proportions dans lesquelles les métaux sont combinés pour former lesdits alliages ternaires peuvent, en conséquence, être mesurées par les rapports de leurs triangles représentatifs au triangle total comme surface et comme hauteur. Divisant la hauteur du grand triangle en 100 parties égales, les hauteurs des petits triangles mesurées à l'aide de la même unité représenteront les proportions en centièmes des trois éléments de l'alliage donné.

Un moment de réflexion nous montrera que nous avons là précisément ce qu'il nous faut. Chaque point du triangle représente un alliage triple; il ne peut exister d'alliage triple qui ne soit représenté dans notre triangle. Nous avons devant nous un champ qui circonscrit exactement nos recherches, et nous pouvons entreprendre de l'explorer en comprenant clairement ce que nous ferons. La topographie peut en être étudiée aussi systématiquement et complètement que celle de tout autre territoire dont les limites exactes ont été déterminées et tracées.

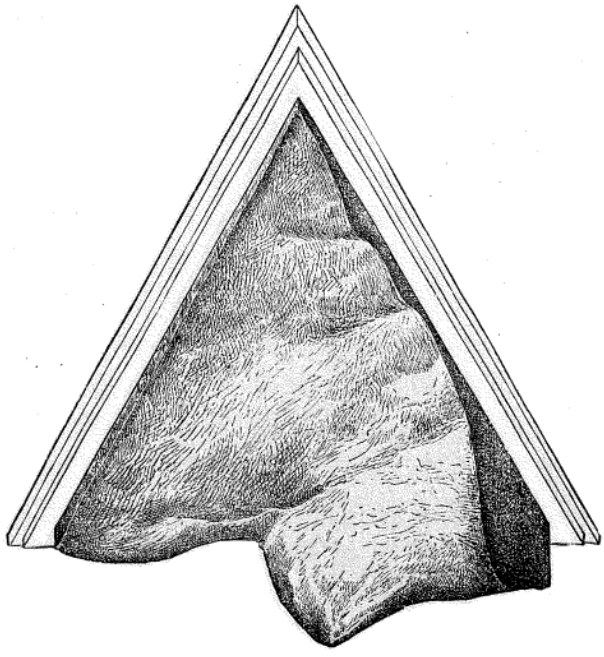


Fig. 7.

Les premières recherches faites par l'auteur, à l'aide de ce système, donnent, pour la résistance des alliages binaires et ternaires cuivre-étain-zinc, un modèle en relief dont nous donnons l'image (fig. 7). On trouvera les résultats dans les rapports de la Commission déjà mentionnée, et les détails de construction se trouvent dans les comptes rendus de l'*American association for advencement of science*, auxquels il est fait allusion plus haut et dans le *Treatise on the Materials of Engineering*, de l'auteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le plus important résultat de ces recherches, en dehors de l'importance de recherches explorant complètement un champ, pour la plus grande partie inconnu, a été la découverte de la place occupée dans ce champ par les alliages de plus grande résistance. En mélangeant environ 55 % de cuivre, 1 % d'étain, 44 % de zinc, d'après les déterminations faites par l'auteur avec des métaux du commerce ou 57,1 et 42, suivant les déterminations faites plus tard avec des alliages chimiquement purs, on obtient le « bronze le plus résistant qu'un homme puisse faire.» [1].

Depuis l'inauguration de ce système par l'auteur, l'enregistrement autographique de l'histoire d'une éprouvette est devenu chose commune, et même habituelle dans les recherches de ce genre faites en Amérique, et chaque laboratoire d'ingénieurs et de mécanique appliquée comprend des machines à essayer, souvent de très grandes dimensions, munies d'enregistreurs autographiques. Celui du collège de « Sibley », par exemple, contient vingt machines à essayer, comprenant des machines permettant de faire des essais de la traction et à la compression jusqu'à des charges [1] de 200 000 et 300 000 livres (90 718 et 136 078 kilogrammes) et des machines pour essais à la torsion et à la traction munies d'enregistreurs automatiques.

Il reste cependant beaucoup à faire pour étudier plus complètement ces sujets, si importants pour l'ingénieur, et on peut espérer avec confiance que de grands et utiles travaux seront faits dans un avenir rapproché ; on peut ainsi espérer, ce qui est encore plus important, que les découvertes déjà faites et familières à tout ingénieur instruit et à tout homme de science finiront par être utilisées par la catégorie d'hommes la plus conservatrice qui existe, ceux qui étudient les constructions, dont dépendent la durée et la sécurité des réseaux de chemins de fer, des ponts et des autres constructions auxquelles sont confiées les vies et les fortunes de tous ceux qui sont appelés à les utiliser pour leurs affaires.

1. *Journal Franklin inst.*, Feb. 1885 ; *Trans. A. S. C. E.*, Jan., June, 1881.

ROBERT H. THURSTON.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU DES ALLONGEMENTS MAXIMUM

d'éprouvettes de torsion de 1 pouce de long et 5/8 de pouce de diamètre

Si A = l'angle total de torsion, l'allongement d'une fibre extérieure est $\sqrt{1+A^2\times 0{,}00002974775}-1$.

ANGLE de TORSION	ALLONGEMENT	SECTION réduite ÉQUIVALENTE	ANGLE de TORSION	ALLONGEMENT	SECTION réduite ÉQUIVALENTE	ANGLE de TORSION	ALLONGEMENT	SECTION réduite ÉQUIVALENTE
degrés			degrés			degrés		
				De 1° à 90°				
1	0.000,015	1.000	31	0.014,193	0.986	61	0.053,894	0.948
2	0.000,060	1.000	32	0.015,117	0.985	62	0.055,628	0.946
3	0.000,134	1.000	33	0.016,069	0.984	63	0.057,388	0.945
4	0.000,238	1.000	34	0.017,049	0.983	64	0.059,173	0.944
5	0.000,372	1.000	35	0.018,057	0.982	65	0.060,983	0.942
6	0.000,535	1.000	36	0.019,094	0.981	66	0.062,818	0.940
7	0.000,729	0.999	37	0.020,159	0.980	67	0.064,677	0.938
8	0.000,951	0.999	38	0.021,252	0.979	68	0.066,561	0.937
9	0.000,951	0.999	39	0.022,373	0.978	69	0.068,470	0.935
10	0.001,204	0.999	40	0.023,522	0.977	70	0.070,404	0.934
11	0.001,486	0.998	41	0.024,698	0.976	71	0.072,361	0.932
12	0.001,798	0.998	42	0.025,902	0.975	72	0.074,343	0.931
13	0.002,140	0.998	43	0.027,134	0.973	73	0.076,348	0.929
14	0.002,511	0.997	44	0.028,393	0.972	74	0.078,378	0.927
15	0.002,911	0.997	45	0.029,679	0.971	75	0.080,431	0.925
16	0.003,341	0.996	46	0.030,993	0.969	76	0.082,508	0.924
17	0.003,800	0.996	47	0.032,334	0.968	77	0.084,608	0.922
18	0.004,289	0.995	48	0.033,702	0.967	78	0.086,731	0.921
19	0.004,807	0.995	49	0.035,096	0.966	79	0.088,878	0.919
20	0.005.355	0.994	50	0.036,518	0.965	80	0.091,048	0.917
21	0.006,538	0.994	51	0.037,966	0.963	81	0.093,241	0.915
22	0.007,175	0.993	52	0.039,441	0.962	82	0.095,456	0.913
23	0.007,838	0.993	53	0.040,943	0.960	83	0.097,694	0.911
24	0.008,531	0.992	54	0.042,470	0.959	84	0.099,955	0.909
25	0.009,253	0.991	55	0.044,025	9.957	85	0.102,238	0.907
26	0.010,005	0.990	56	0.045,605	0.956	86	0.104,543	0.906
27	0.010,785	0.989	57	0.047,211	0.955	87	0.106,870	0.904
28	0.011,594	0.989	58	0.048,843	0.953	88	0.109,219	0.902
29	0.012,432	0.988	59	0.050,501	0.952	89	0.111,590	0.900
30	0.015,298	0.987	60	0.052,184	0.950	90	0.113,982	0.898
				De 91° à 180°.				
91	0.116,396	0.897	121	0.198,139	0.835	151	0.295,484	0.772
92	0.118,832	0.894	122	0.201,152	0.833	152	0.298,958	0.770
93	0.121,289	0.893	123	0.204,182	0.830	153	0.302,446	0.768
94	0.123,767	0.890	124	0.207,229	0.828	154	0.305,947	0.766
95	0.126,265	0.889	125	0.210,293	0.826	155	0.309,462	0.764
96	0.128,785	0.887	126	0.213,374	0.824	156	0.312,989	0.762
97	0.131,325	0.885	127	0.216,471	0.822	157	0.316,530	0.760
98	0.133.886	0.883	128	0.219,585	0.820	158	0.320,084	0.758
99	0.136.467	0.881	129	0.222,715	0.818	159	0.323,651	0.756
100	0.139,069	0.879	130	0.225,862	0.816	160	0.327,231	0.754
101	0.141,690	0.877	131	0.229,024	0.814	161	0.330,824	0.752
102	0.144,332	0.875	132	0.232,203	0.812	162	0.334,429	0.750
103	0.146,993	0.873	133	0.235,398	0.810	163	0.338,046	0.748
104	0.149,675	0.870	134	0.238,608	0.808	164	0.341,676	0.746
105	0.152,375	0.868	135	0.241,834	0.805	165	0.345,319	0.743
106	0.155,096	0.866	136	0.245,076	0.803	166	0.348,973	0.741
107	0.157,835	0.864	137	0.248,333	0.801	167	0.352,640	0.740
108	0.160,594	0.862	138	0.251,605	0.799	168	0.356,319	0.738
109	0.163,371	0.860	139	0.254,893	0.797	169	0.360,009	0.735
110	0.166,168	0.858	140	0.258,195	0.795	170	0.363,712	0.734
111	0.168,983	0.856	141	0.261,513	0.793	171	0.367,426	0.731
112	0.171,817	0.854	142	0.264,845	0.791	172	0.371,152	0.729
113	0.174,670	0.852	143	0.268,192	0.789	173	0.374,889	0.727
114	0.177,541	0.850	144	0.271,554	0.787	174	0.378,638	0.725
115	0.180,430	0.847	145	0.274,930	0.784	175	0.382,398	0.723
116	0.183,337	0.845	146	0.278,320	0.782	176	0.386,170	0.721
117	0.186,262	0.843	147	0.281,725	0.781	177	0.389,952	0.720
118	0.189.205	0.841	148	0.285,144	0.778	178	0.393,746	0.718
119	0.192,165	0.839	149	0.288,577	0.776	179	0.397,551	0.716
120	0.195,143	0.837	150	0.292,023	0.774	180	0.401,366	0.714

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ANGLE de TORSION	ALLONGEMENT	SECTION réduite ÉQUIVALENTE	ANGLE de TORSION	ALLONGEMENT	SECTION réduite ÉQUIVALENTE	ANGLE de TORSION	ALLONGEMENT	SECTION réduite ÉQUIVALENTE
degrés			degrés			degrés		
				De 181° à 270°.				
181	0.405,193	0.712	211	0.524,598	0.656	241	0.651,599	0.606
182	0.409,030	0.710	212	0.528,719	0.654	242	0.655,943	0.604
183	0.412,877	0.708	213	0.532,849	0.653	243	0.660,294	0.602
184	0.416,736	0.706	214	0.536,987	0.651	244	0.664,651	0.601
185	0.420,604	0.704	215	0.541,133	0.649	245	0.669,014	0.599
186	0.424,483	0.702	216	0.545,287	0.647	246	0.673,384	0.598
187	0.428,373	0.700	217	0.549,449	0.645	247	0.677,761	0.596
188	0.432,272	0.698	218	0.553,619	0.644	248	0.682,143	0.594
189	0.436,182	0.696	219	0.557,797	0.642	249	0.686,532	0.593
190	0.440,102	0.694	220	0.561,983	0.641	250	0.690,927	0.592
191	0.444,032	0.692	221	0.566,177	0.639	251	0.695,328	0.590
192	0.447,971	0.691	222	0.570,378	0.637	252	0.699,736	0.589
193	0.451,921	0.689	223	0.574,588	0.635	253	0.704,149	0.587
194	0.455,880	0.687	224	0.578,804	0.634	254	0.708,568	0.585
195	0.459,849	0.685	225	0.583,029	0.632	255	0.712,994	0.584
196	0.463,827	0.683	226	0.587,261	0.630	256	0.717,425	0.582
197	0.467,815	0.682	227	0.591,500	0.628	257	0.721,862	0.581
198	0.471,812	0.680	228	0.595,747	0.627	258	0.726,305	0.579
199	0.475,819	0.678	229	0.600,001	0.625	259	0.730,754	0.578
200	0.479,834	0.676	230	0.604,262	0.623	260	0.735,208	0.576
201	0.483,859	0.674	231	0.608,530	0.622	261	0.739,668	0.575
202	0.487,894	0.672	232	0.612,806	0.620	262	0.744,134	0.573
203	0.491,937	0.670	233	0.617,089	0.618	263	0.748,606	0.572
204	0.495,989	0.668	234	0.621,378	0.616	264	0.753,083	0.570
205	0.500,050	0.667	235	0.625,675	0.615	265	0.757,565	0.568
206	0.504,120	0.665	236	0.629,979	0.613	266	0.762,053	0.567
207	0.508,198	0.663	237	0.634,289	0.612	267	0.766,547	0.566
208	0.512,285	0.661	238	0.638,607	0.610	268	0.771,046	0.565
209	0.516,381	0.660	239	0.642,931	0.609	269	0.775,550	0.563
210	0.520,485	0.658	240	0.647,261	0.607	270	0.780,059	0.562
				De 271° à 600°.				
271	0.784,574	0.560	304	0.936,277	0.516	337	1.092,468	0.478
272	0.789,094	0.559	305	0.940,949	0.515	338	1.097,261	0.477
273	0.793,619	0.558	306	0.945,626	0.514	339	1.102,056	0.476
274	0.798,150	0.556	307	0.950,307	0.512	340	1.106,855	0.475
275	0.802,685	0.555	308	0.954,991	0.511	341	1.111,658	0.474
276	0.807,226	0.553	309	0.959,680	0.510	342	1.116,463	0.472
277	0.811,771	0.552	310	0.964,372	0.509	343	1.121,272	0.471
278	0.816,322	0.551	311	0.969,069	0.508	344	1.126,083	0.470
279	0.820,877	0.549	312	0.973,769	0.507	345	1.130,898	0.469
280	0.825,438	0.458	313	0.978,473	0.505	346	1.135,716	0.468
281	0.830,003	0.546	314	0.983,182	0.504	347	1.140,537	0.467
282	0.834,574	0.545	315	0.987,893	0.503	348	1.145,360	0.466
283	0.839,149	0.543	316	0.992,609	0.502	349	1.150,187	0.465
284	0.843,728	0.542	317	0.997,329	0.500	350	1.155,017	0.464
285	0.848,313	0.541	318	1.002,052	0.499	351	1.159,850	0.463
286	0.852,902	0.540	319	1.006,779	0.498	352	1.164,686	0.462
287	0.857,496	0.538	320	1.011,509	0.497	353	1.169,525	0.461
288	0.862,095	0.537	321	1.016,244	0.496	354	1.174,366	0.460
289	0.866,698	0.536	322	1.020,981	0.495	355	1.179,211	0.459
290	0.871,306	0.534	323	1.025,723	0.494	356	1.184,058	0.458
291	0.875,918	0.533	324	1.030,468	0.493	357	1.188,909	0.457
292	0.880,535	0.532	325	1.035,216	0.492	358	1.193,762	0.456
293	0.885,156	0.530	326	1.039,969	0.490	359	1.198,618	0.455
294	0.889,782	0.529	327	1.044,724	0.489	360	1.203,476	0.454
295	0.894,412	0.528	328	1.049,483	0.488	370	1.252,214	0.444
296	0.899,047	0.527	329	1.054,246	0.487	380	1.301,218	0.434
297	0.903,686	0.525	330	1.059,012	0.486	390	1.350,454	0.425
298	0.908,329	0.524	331	1.063,781	0.485	400	1.399,925	0.417
299	0.912,976	0.523	332	1.068,554	0.483	420	1.499,501	0.400
300	0.917,628	0.522	333	1.073,330	0.482	460	1.700,856	0.370
301	0.922,284	0.520	334	1.078,110	0.481	500	1.904,641	0.344
302	0.926,944	0.519	335	1.082,893	0.480	540	2.110,377	0.321
303	0.931,608	0.518	336	1.087,679	0.479	600	2.421,869	0.292

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

V

MÉMOIRE

SUR

LES ÉPREUVES A BILLE EN ACIER

COMMUNICATION

Présentée par M. J.-A. BRINELL

INGÉNIEUR EN CHEF; FAGERSTA, WESTANFORS (SUÈDE)

MÉTHODE NOUVELLE

pour déterminer la dureté, la résistance, la limite d'élasticité apparente, l'allongement et les défauts d'homogénéité des aciers coulés, de même aussi que la dureté de certains autres corps solides, au moyen d'une petite bille en acier trempé, faisant empreinte dans la matière éprouvée.

Bien qu'il ne manque aucunement de méthodes proposées pour déterminer la dureté des corps solides, il n'y en a guère, jusqu'à présent, dont le caractère d'une certaine universalité d'usage et d'application l'aurait emporté sur les autres pour être généralement reconnue et acceptée. Mais il n'y a rien d'étonnant dans ce fait, qui s'explique par la double raison, d'un côté, de la diversité d'objets et de matières, qui exigerait bien une pluralité de modes et de méthodes, et, de l'autre, d'une certaine divergence quant au sens et à la portée du terme même de dureté.

Je ne risquerai guère de rencontrer trop d'opposition, en supposant que l'acception le plus généralement attribuée à ce terme serait celle de la propriété d'une certaine résistance offerte par un corps à la pression y exercée par un autre, sous l'influence d'une force quelconque d'impulsion. Pour les appréciations comparatives de cette propriété en fait de métaux, on s'est servi et on se sert encore, ordinairement, du poinçon en acier trempé (dont plusieurs modèles se retrouvent, ci-joints, dans la figure 1, d'après l'*Enseignement sur les matériaux pour la construction des machines*, par M. le professeur A. Martens.

Parmi les méthodes modernes, inventées à ce propos, je me permettrai de rappeler ici la méthode Föppl, avec deux éprouvettes tirées de la matière à essayer, et tournées en forme cylindrique au même diamètre, lesquelles éprouvettes devront être placées à angle droit, l'une au-dessus de l'autre (en croix) et mises sous une pression suffisante, quand l'aplatissement des parties qui se trouveront en contact servira pour déterminer la dureté de la matière en question. Sans doute, c'est une idée très ingénieuse que d'essayer une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

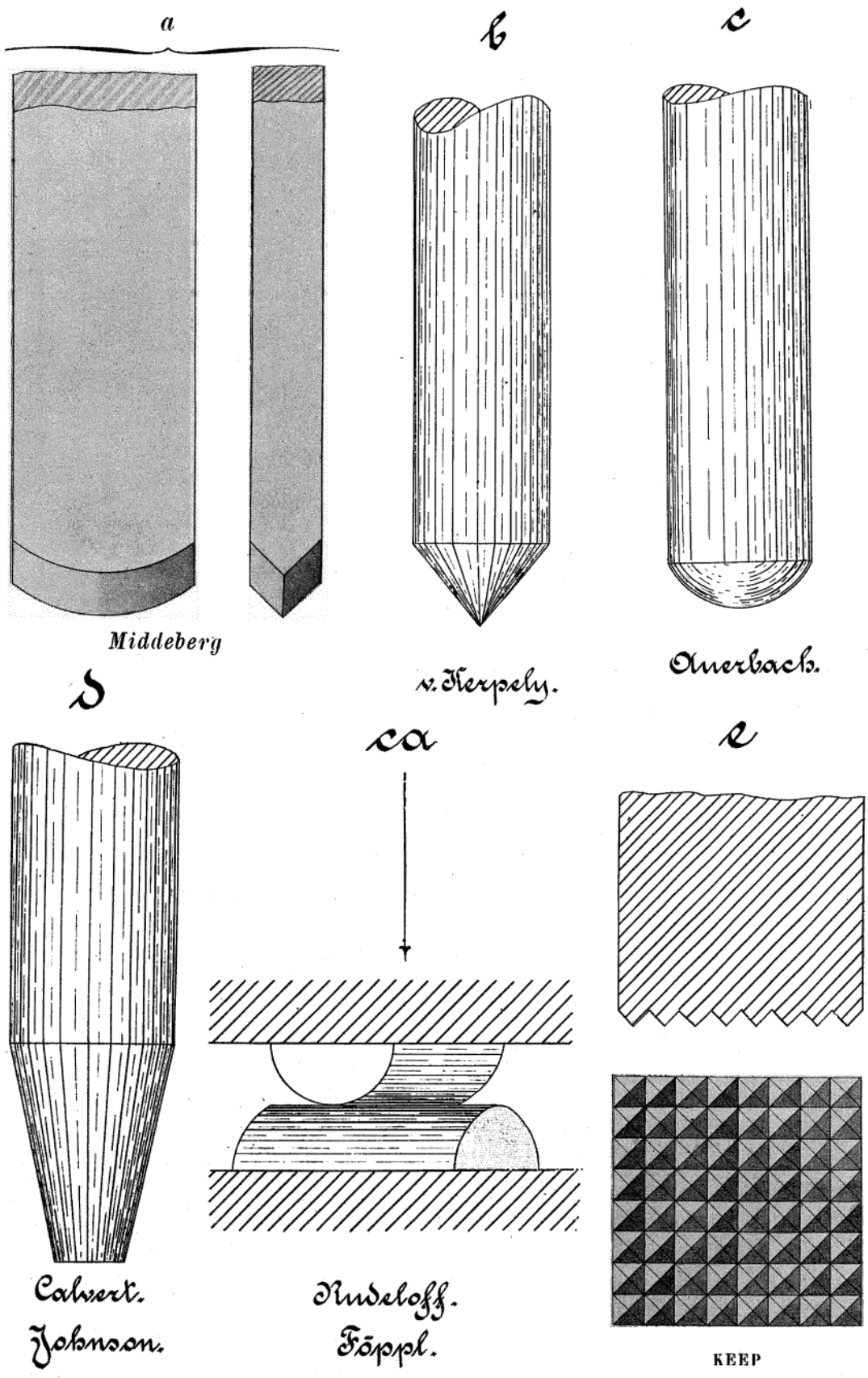


Fig. 1.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

matière, pour ainsi dire, par soi-même, en se passant de toute sorte de médium ou d'étalon d'une autre matière quelconque, mais cette méthode-là aura toujours l'inconvénient d'être assez compliquée, en même temps que très coûteuse et, encore, un peu lente d'exécution, comme exigeant d'abord un travail préparatoire d'une certaine précision, et puis, des arrangements spéciaux pour maintenir en position les éprouvettes pendant l'essai, de même que, en bien des cas, l'insuffisance de la matière, ou l'impossibilité d'en détacher des éprouvettes, en rendra souvent l'application très difficile, ou bien même impossible.

En fait de détermination de la dureté des corps solides, on ne pourrait accepter, ni reconnaître, comme suffisamment effective et utile, aucune méthode qui ne remplît à la fois plusieurs des conditions formulées comme suit :

De rendre toujours des résultats homologues et exacts;

D'être facile à apprendre et à exécuter;

De ne pas exiger de préparatifs, ni compliqués, ni impliquant des pertes de temps et de frais;

De s'opérer au moyen d'un médium de pression, facile à se procurer, et peu coûteux, inaltérable de forme, en même temps que d'une dureté constante et suffisante;

De s'adapter pour essayer des pièces finies, comme par exemple des plaques de blindage, des projectiles, etc., sans causer de déformations, ni de détériorations qui feraient rebuter la pièce essayée;

De servir à déterminer la dureté absolue de l'objet d'essai, et non seulement la dureté comparative de deux ou plusieurs objets.

D'après la méthode que je me permettrai de montrer, à l'occasion de ce Congrès de gens illustres et distingués, il s'agit d'obtenir des impressions superficielles, d'une profondeur minima, produites dans les objets d'essai au moyen d'une bille ou d'un petit boulet en acier trempé. En mesurant le diamètre de ces impressions, afin d'en calculer ensuite la superficie sphérique, et en divisant par cette superficie la pression dont j'ai fait usage, j'obtiens une expression numérique que j'appelle *nombre de dureté*, indiquant, exprimé en kilogrammes par millimètre carré, l'effet produit par ladite pression.

La propriété caractéristique des boulets en acier trempé de pénétrer, sans se casser, dans les corps les plus durs, comme par exemple dans les aciers trempés les plus riches en carbone, est bien connue, ayant été constatée plus d'une fois par des expériences faites dans le but d'en déterminer la charge de rupture. J'ai constaté moi-même, au cours de mes expériences dans les usines de Fagersta, en Suède, que ces boulets pourront être enfoncés, et même d'une manière assez considérable, sans se casser, ni s'aplatir, dans de la fonte coulée en coquille. Cette propriété est due, tant à leur forme sphérique qu'à leur perfection et à leur homogénéité de trempe, produite par la réfrigération instantanée s'opérant au moment de la trempe de ces petits corps durs de forme unie, et l'on comprendra qu'il serait difficile de trouver quelque chose de mieux approprié pour essayer la dureté des autres corps quelconques, que ces boulets-là en acier trempé.

En commençant mes expériences, je n'avais guère d'autre but, ni motif, que de trouver un procédé simple et rapide pour faire contrôler par un ouvrier quelconque, pendant la marche de la fabrication des aciers Martin, les teneurs respectives en carbone sans avoir recours à des ouvriers spécialistes (appelés « vérificateurs d'acier »). A cette époque-là, je me suis contenté de mesurer la profondeur de l'empreinte, au lieu du diamètre, comme cela se fait à présent, afin d'en obtenir la superficie au moyen d'un instrument spécial, construit pour ce but. Cet instrument consiste en un microscope vertical, agrandissant de 30 à 40 fois, à tube mobile à l'aide d'une vis, en sens rectiligne horizontal, et muni d'un vernier (voir fig. 2).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Après avoir installé ce tube au-dessus de l'empreinte, l'éprouvette étant placée ordinairement sur le support B, de manière que la ligne de mire touche, en tangente, l'un des bords de l'empreinte, je fais passer le tube par-dessus, jusqu'à ce que ladite ligne touche de même, en tangente, le bord opposé, pour lire ensuite sur le vernier la distance parcourue, en d'autres termes le diamètre de l'empreinte, qui m'en donnera l'aire, au moyen de laquelle

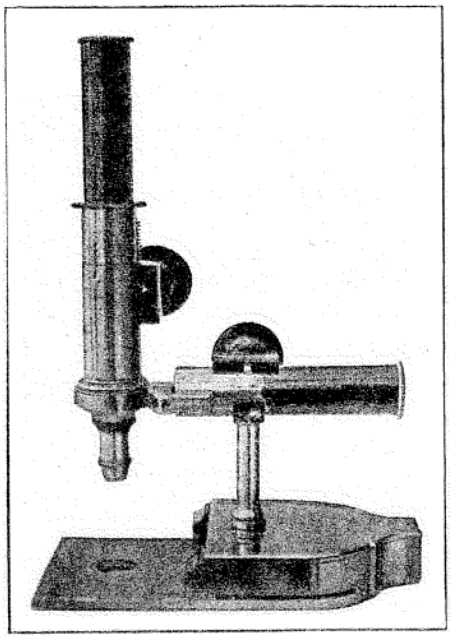


Fig. 2.

je trouve enfin, par l'opération arithmétique susmentionnée, le nombre de dureté indiquant en kilogrammes la pression exercée par millimètre carré. Afin de faciliter cette opération de calcul, j'ai dressé le barème ci-contre (voir p. 88 et 89) où l'on trouvera immédiatement le nombre de dureté (avec une certaine pression), dès que l'on aura constaté le diamètre de l'empreinte.

En faisant les épreuves à bille en acier, on pourra procéder de deux manières :

1° Soit en se servant toujours d'une et même pression, la différence des corps divers en fait de dureté s'accusant alors par la grandeur différente des impressions;

2° Soit en enfonçant toujours la bille jusqu'à la même profondeur, et en observant les différentes pressions[1].

De ces deux modes d'application de la méthode, la première, qui est la moins compliquée et la plus commode, suffira en général pour les buts ordinaires, tandis que l'autre sera préférable, dès qu'il sera question d'une détermination plus précise, comme les impressions faites à une profondeur déterminée produiront toujours un et même effet de déformation, ou, en d'autres termes, de compression mécanique de la matière. Dans les expériences dont je m'occuperai présentement, je me suis servi de la première méthode, à savoir avec uniformité de pression et différence de profondeur d'enfoncement[2].

1. Quant à mes expériences d'après ce mode d'opération, je n'en suis pas encore arrivé au bout, mais j'espère que je pourrai sans trop de retard en présenter les résultats.

2. Afin de déterminer l'influence qu'exerceront sur les résultats de ces épreuves, d'un côté, les différents calibres des billes, avec la même pression, et, de l'autre, les différetnes pressions, avec un et même calibre de bille, j'ai

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En fait de préparatifs, il ne faut pas grand' chose. En se servant d'éprouvettes détachées de l'objet d'essai, on aura soin seulement d'en rendre les deux surfaces d'en haut et d'en bas parallèles, ou à peu près, et de leur donner une largeur qui en permettra l'installation sur place dans l'appareil de pression, mais qui sera en même temps suffisante pour que l'impression puisse être produite à quelque distance du bord, de manière à ne pas causer de gonflement dans l'une ou l'autre des surfaces latérales. Quant à la hauteur de l'éprouvette, ce sera une question de moins d'importance, comme il est bien montré que l'on obtiendra avec des éprouvettes de 2,5^{mm} d'épaisseur le même nombre de dureté qu'avec celles de 10 millimètres.

Pour effectuer la pression, je me suis servi, au commencement, de l'appareil Mohr et Federhaff, et plus tard d'un appareil spécial moins compliqué et moins coûteux, construit pour ce but exprès (voir fig. 3).

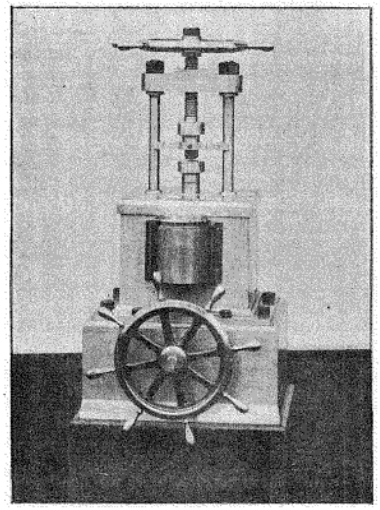


Fig. 3.

Cet appareil se compose de deux pièces ou plaques horizontales, entre lesquelles s'opérera la pression, au moyen d'un piston vertical en vis, muni en haut d'une roue horizontale, et soutenant d'en haut la pièce supérieure A, tandis que la pièce B est supportée par un système de ressorts, et combinée à un manomètre à cadran. En plaçant entre ces deux plaques l'éprouvette avec la bille, et en faisant descendre, à l'aide de la roue, la plaque supérieure jusqu'à la pression voulue, indiquée par le manomètre, on obtiendra donc une impression plus ou moins accentuée, tout selon la nature de la matière dont on fait l'essai.

Le calibre des billes dont je me suis servi pour mes expériences a été, en général, de 10 millimètres, quelquefois de 5 millimètres avec diverses pressions selon les matériaux. Ainsi, j'ai fait usage d'une pression de 3 tonnes (de 1000 kilogrammes), en fait de fers et d'aciers de toute espèce, mais de 500 kilogrammes pour les métaux moins durs, comme l'étain et le cuivre, et pour les bois de 50 kilogrammes seulement.

Quant aux buts divers, pour lesquels j'ai fait jusqu'à présent l'application de la méthode en question, je me permettrai d'en faire ici l'énumération comme suit :

Pour déterminer la dureté, tant absolue que relative, de fers et d'aciers divers, de même que de plusieurs autres métaux, ainsi que de certaines espèces de bois ;

fait des expériences dont il résulte (voy. table graphique, pl. I) que la diminution de calibre, dans le premier cas, et, dans le second, la pression plus forte, donneront de même un nombre de dureté plus élevé.

L'explication de ce fait serait qu'il y eût lieu, dans les deux cas également, à une déformation plus grande, ou, ce qui revient au même, à une compression mécanique plus considérable de la matière, ce qui servirait à en augmenter la dureté.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU A.

BARÊME

Pour déterminer la dureté et la résistance de certains corps solides au moyen d'épreuves

A BILLE EN ACIER

(Bille de 10 mm.)

d	a	D = 5000/a	D = 3000/a	D = 1000/a	D = 500/a	D = 200/a	R = C.D
1,50	1,8095	2770	1660	551	277	111	»
1,55	1,8975	2640	1582	528	264	105	»
1,60	2,0232	2480	1487	495	248	99	»
1,65	2,1866	2290	1373	458	229	91,5	»
1,70	2,2871	2180	1310	437	218	87,5	»
1,75	2,4378	2055	1236	411	206	82	»
1,80	2,5761	1940	1164	388	194	77,5	»
1,85	2,7112	1848	1108	368	185	73,8	»
1,90	2,8620	1750	1048	350	175	69,9	»
1,95	3,0159	1660	995	332	166	66,2	»
2,00	3,1762	1577	946	316	157,7	63	»
2,05	3,3427	1498	898	298	149,8	59,8	»
2,10	3,529	1430	857	286	143	57	»
2,15	3,6757	1361	817	273	136	54	»
2,20	3,8485	1304	782	261	130	52	»
2,25	4,0275	1242	744	248	124	50	»
2,30	4,2097	1189	713	238	119	48	»
2,35	4,3982	1139	683	227	114	46	»
2,40	4,5930	1090	652	218	109	44	»
2,45	4,7885	1045	627	209	105	42	»
2,50	4,9889	1000	600	200	100	40	»
2,55	5,1931	963	578	193	96	39	»
2,60	5,4036	925	555	185	93	37	»
2,65	5,6188	889	532	178	89	36	»
2,70	5,8340	855	512	171	86	34	»
2,75	6,0586	827	495	166	83	33	»
2,80	6,2832	798	477	159	80	32	»
2,85	6,5172	767	460	153	77	31	»
2,90	6,7513	741	444	148	74	30	»
2,95	6,9696	718	430	144	73	29	»
3,00	7,1880	696	418	140	70	28	»
3,05	7,4629	670	402	134	67	27	»
3,10	7,7378	645	387	129	65	26	»
3,15	8,0001	625	375	125	63	25	»
3,20	8,2624	606	364	121	61	24	»
3,25	8,5310	587	351	117	59	23,5	»
3,30	8,7996	569	340	114	57	23	118
3,35	9,0792	551	332	111	55	22	115
3,40	9,3588	535	321	107	54	21,4	111
3,45	9,6478	518	311	104	52	20,7	108
3,50	9,9369	503	302	101	50	20,2	105
3,55	10,2353	488	293	98	49	19,6	102
3,60	10,5338	476	286	95	48	19	99,5
3,65	10,8416	462	277	92	46	18,45	96
3,70	11,1495	448	269	90	45	18	93,5
3,75	11,4495	436	262	88	44	17,5	91
3,80	11,7496	425	255	85	43	17	88,5
3,85	12,0951	414	248	83	41	16,5	86
3,90	12,4407	402	241	81	40	16	84
3,95	12,7785	392	235	78	39	15,6	81,5
4,00	13,1162	382	228	76	38	15,2	79
4,05	13,4712	372	223	75	37	14,9	77,5
4,10	13,8262	362	217	73	36	14,5	75,5
4,15	14,1749	353	212	71	35	14,1	73,5
4,20	14,5236	345	207	69	34,5	13,8	72
4,25	14,8943	336	202	67	33,6	13,4	70
4,30	15,2650	326	196	65	32,6	13,1	68
4,35	15,6451	319	192	64	32	12,8	66,5
4,40	16,0253	312	187	63	31,2	12,5	65
4,45	16,4148	304	183	61	30,4	12,2	63,5
4,50	16,8044	297	179	60	29,7	12	62
4,55	17,2065	291	174	58	29,1	11,6	60,5
4,60	17,6087	284	170	57	28,4	11,4	59
4,65	18,0186	278	166	56	27,8	11,1	57,5
4,70	18,4286	272	163	54	27,2	10,9	56,5
4,75	18,8527	265	159	53	26,5	10,6	55
4,80	19,2768	259	156	52	25,9	10,4	54,3
4,85	19,7135	254	153	51	25,4	10,1	53
4,90	20,1502	249	149	50	24,9	9,9	51,9
4,95	20,5978	244	146	49	24,4	9,7	50,8
5,00	21,0455	238	143	48	23,8	9,5	49,6
5,05	21,5041	233	140	46,5	23,3	9,3	48,6
5,10	21,9629	228	137	45,5	22,8	9,1	47,5
5,15	22,4357	223	134	44,5	22,3	8,9	46,5
5,20	22,9085	218	131	44	21,8	8,7	45,5
5,25	23,3939	215	128	43	21,5	8,6	44,5
5,30	23,8793	210	126	42	21	8,4	43,7
5,35	24,3694	206	124	41	20,6	8,2	43
5,40	24,8720	201	121	40	20,1	8	42
5,45	25,3778	197	118	39,5	19,7	7,9	41
5,50	25,8931	193	116	39	19,3	7,7	40,3
5,55	26,4114	190	114	38	19	7,6	39,6
5,60	26,9392	186	112	37	18,6	7,4	38,9
5,65	27,4733	182	109	36,5	18,2	7,3	37,9
5,70	28,0168	178	107	35,7	17,8	7,1	37,2
5,75	28,5634	175	105	35	17,5	7	36,5
5,80	29,1163	172	103	34,4	17,2	6,9	35,7
5,85	29,6818	169	101	33,8	16,9	6,75	35
5,90	30,2536	166	99	33	16,6	6,6	34,4
5,95	30,8316	162	97	32,5	16,2	6,5	33,7
6,00	31,4160	159	95	32	15,9	6,4	33
6,05	32,0066	156	94	31	15,6	6,25	32,7
6,10	32,6098	153	92	30,6	15,3	6,15	32
6,15	33,2136	151	90	30	15,1	6	31,3
6,20	33,8350	148	89	29,6	14,8	5,9	30,9
6,25	34,4602	145	87	29	14,5	5,8	30,3
6,30	35,0634	143	86	28,5	14,3	5,7	29,9
6,35	35,7325	140	84	28	14	5,6	29,2
6,40	36,3828	138	82	27,5	13,8	5,5	28,5
6,45	37,0426	135	81	27	13,5	5,4	28,1
6,50	37,7086	133	80	26,5	13,3	5,3	27,8
6,55	38,3872	131	79	26	13,1	5,2	27,5
6,60	39,0720	128	77	25,5	12,8	5,1	26,8
6,65	39,7632	126	76	25,2	12,6	5	26,4
6,70	40,4700	124	74	24,7	12,4	4,95	25,7
6,75	41,1832	122	73	24,4	12,2	4,87	25,4
6,80	41,9058	119	71,5	23,8	11,9	4,8	24,9
6,85	42,6409	117	70	23,5	11,7	4,7	24,4
6,90	43,3855	115	69	23	11,5	4,6	»
6,95	44,1394	113	68	22,5	11,3	4,5	»
7,00	44,9028	111	67	22	11,1	4,4	»
7,05	45,6877	109	65,5	21,8	10,9	4,36	»
7,10	46,4642	107,5	64,5	21,5	10,75	4,3	»
7,15	47,2622	106	63,5	21,2	10,6	4,24	»
7,20	48,0696	104	62,5	20,8	10,4	4,16	»
7,25	48,8895	102,2	61,5	20,4	10,22	4,9	»
7,30	49,7221	100,2	60,3	20,1	10,02	4,2	»
7,35	50,5703	99	59,4	19,8	9,9	3,95	»
7,40	51,4279	97,6	58,6	19,5	9,76	3,9	»
7,45	52,2982	96	57,5	19,2	9,6	3,84	»
7,50	53,1810	94,5	56,5	18,9	9,45	3,77	»
7,55	54,0795	92,8	55,6	18,5	9,28	3,7	»
7,60	54,9905	91,3	54,8	18,2	9,13	3,65	»
7,65	55,9173	89,8	53,9	17,9	8,98	3,59	»
7,70	56,8567	88,3	53	17,6	8,83	3,53	»
7,75	57, 733	87	52,1	17,3	8,7	3,47	»
7,80	58,7824	85,4	51,2	17,1	8,54	3,41	»
7,85	59,8192	83,8	50,3	16,8	8,38	3,35	»
7,90	60,7742	82,5	49,5	16,5	8,25	3,3	»
7,95	61,7931	81,2	48,7	16,2	8,12	3,25	»
8,00	62,832	80	48	16	8	3,2	»

p = Kilogrammes de pression. | a = Aire de l'impression. | R = Limite de résistance.
d = Diamètre de l'impression. | D = Nombre de dureté. | C = Coefficient (C × D = R).

Pour les aciers Martin ou Bessemer, doux et demi-durs, laminés (*Fagersta*), non trempés, ni martelés, ni autrement traités à froid : C = 0,346.

N. B. — Variant un peu, d'après la provenance d'usines diverses (surtout selon la teneur de phosphore).

$R = C.D.$ | $D = \frac{p}{a}$.

TABLEAU A.

BARÊME

Pour déterminer la dureté et la résistance de certains corps solides au moyen d'épreuves

A BILLE EN ACIER

(Bille de 10 mm.)

p = Kilogrammes de pression. | a = Aire de l'impression. | R = Limite de résistance.
d = Diamètre de l'impression. | D = Nombre de dureté. | C = Coefficient (C × D = R).

Pour les aciers Martin ou Bessemer, doux et demi-durs, laminés (*Fagersta*), non trempés, ni martelés, ni autrement traités à froid : C = 0,346.

N. B. — Variant un peu, d'après la provenance d'usines diverses (surtout selon la teneur de phosphore).

$R = C.D.$ | $D = \frac{p}{a}$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour déterminer les diversités de dureté dans un et même corps en sens divers, comme par exemple la dureté d'un bois, en coupe longitudinale et en coupe transversale ;

Pour contrôler les essais Eggerts et les essais de forge faits sur des échantillons tirés de charges d'acier Martin ;

Pour déterminer le recuit des aciers ;

Pour déterminer les altérations de dureté produites dans les métaux par l'influence de surchauffage ;

Pour constater l'effet produit, en fait de dureté, par la compression mécanique, dans les fers et les aciers travaillés à froid ;

Pour vérifier l'homogénéité des fers et des aciers ;

Pour déterminer la limite de résistance, l'allongement et la limite d'élasticité apparente dans les aciers coulés ;

Pour déterminer l'aptitude de certains aciers divers de prendre une dureté additionnelle par suite de la trempe ;

Pour constater l'effet des trempes opérées à des températures diverses ;

Pour déterminer l'efficacité de certains liquides de trempe ;

Pour constater l'effet produit par les températures diverses d'un certain liquide de trempe.

Comme il serait trop long de faire, à cette occasion, la description de toutes les expériences que j'ai faites pour ces buts divers, je ne m'occuperai ici que de quelques-unes qui pourront offrir quelque intérêt spécial.

Les recherches les plus compréhensives ont été celles que j'ai faites afin de constater quelle serait l'influence des teneurs diverses en carbone, en manganèse et en silicium, en fait de la dureté des aciers coulés. Le nombre de charges d'acier Martin, dont je me suis servi pour mes expériences à ce propos, a été d'environ 1700. Dans deux tableaux ci-joints (voir pl. II et III), on trouvera le résumé graphique de ces résultats. Il y a surtout un fait constaté par moi, au cours de mes expériences, qui semble digne d'une mention spéciale, comme il indique en effet qu'il y aurait des cas où se présenteront des combinaisons chimiques de nature critique, de même qu'il y a, comme nous le savons, des températures critiques. En dedans de certaines limites de teneur j'ai constaté, dans les aciers de la même teneur en manganèse, mais à des teneurs diverses en silicium, une diversité en fait de dureté, en faveur de l'acier moins riche en silicium, tout à fait contraire à la règle générale que les aciers plus riches en ce dernier constituant seront aussi comparativement les plus durs. Ce fait se ferait peut-être expliquer par quelque combinaison chimique qui aurait lieu, exceptionnellement, entre le manganèse et le silicium se rencontrant dans les limites de certaines teneurs, et qui rendrait alors moins dur cet acier.

L'essai colorimétrique Eggertz, dont se servent généralement les fabricants des aciers Martin, tant en Suède qu'à l'étranger, pour vérifier les teneurs en carbone, ne donnera guère de résultats très exacts et authentiques, à moins d'être exécuté d'une manière très soignée et bien précise, de même qu'il exige aussi que les aciers à essayer aient été portés à une et même température de recuit, et lentement refroidis après, d'une manière uniforme. Pour cette raison, on ne se contente pas non plus, dans la fabrication des aciers, des résultats obtenus de ces essais, comme base unique pour le classement des aciers, en ayant recours, pour cause de contrôle, à des épreuves parallèles au marteau, à côté de ces essais-là. Aux usines de Fagersta, le classement des aciers coulés se fait d'après des épreuves au marteau, les essais colorimétriques servant de contrôle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le grand inconvénient des épreuves au marteau, c'est qu'elles ne pourraient être exécutées que par des ouvriers spécialistes, des gens de confiance dont l'habileté ne s'acquiert qu'après plusieurs années de pratique et d'application à ce travail, et dont la bonne volonté et la disposition au moment de l'exécution influeront, chaque fois, sur l'exactitude du résultat obtenu. Néanmoins, ces épreuves-ci offrent toujours l'avantage de constater, avec la teneur en carbone, l'effet produit par la présence de manganèse et de silicium.

L'épreuve à **bille en acier,** dont on devrait se servir à côté des deux autres est incomparablement supérieure, en fait de facilité à apprendre et à exécuter, en donnant aussi, comme les épreuves au marteau, des résultats en rapport avec les teneurs en manganèse et en silicium, avec celle en carbone. Dans le cas des épreuves à bille en acier, il faudra cependant aussi, pour en obtenir des résultats satisfaisants, non moins que dans le cas des essais Eggertz, que les aciers soient toujours portés à la même température de recuit, et encore qu'on les ait laissés refroidir d'une manière lente et uniforme, à savoir pas plus vite une fois que l'autre.

Dans mes expériences pour déterminer la dureté de certaines espèces de bois, je me suis servi d'éprouvettes coupées tant dans le sens longitudinal que dans le sens transversal du bois. Les résultats de ces expériences ont été réunis dans un diagramme que l'on trouvera ci-joint (voir pl. IV).

Afin de constater l'influence de la compression mécanique sur des aciers de teneurs diverses en carbone, ouvrés à froid, j'ai fait étirer, après recuit, à la même filière, deux barres rondes de 25 millimètres de diamètre, l'une à 1,2 % de carbone et l'autre à 0,25 %, pour en comparer ensuite, au moyen de l'épreuve à bille en acier, la dureté acquise, quand j'ai constaté, pour l'acier à 1,2 % de carbone, un surcroît de dureté de 11,9 %, mais pour celui à 0,25 % jusqu'à 25,5 % de surcroît.

Au moyen de l'épreuve à bille en acier, on obtiendra des expressions numériques pour la dureté additionnelle acquise par des aciers divers par suite de la trempe. Ci-joint on trouvera (pl. V) les résultats d'un nombre d'épreuves faites pour déterminer cette dureté additionnelle en fait de plusieurs aciers divers.

Tous ceux qui se sont occupés de la trempe des aciers savent bien quel est le rôle important des liquides divers de trempe. Afin d'étudier un peu plus près cette question, j'ai fait des expériences avec des aciers divers, au nombre de trois (doux, demi-dur et dur) dont les résultats se retrouvent ci-joints (pl. VI). D'après ces expériences, l'acier demi-dur surpassera, en fait de dureté additionnelle acquise par suite de la trempe aux liquides les plus efficaces, l'acier le plus dur, ce qui dépendra, sans doute, de la teneur élevée en manganèse du premier.

Parmi les applications diverses de cette méthode, je me permettrai de signaler, comme étant surtout d'un intérêt spécial, celle des déterminations de la *limite de résistance,* de l'*allongement* et de la *limite d'élasticité apparente.*

En fait d'aciers coulés, non trempés, d'une teneur en carbone au-dessous de 0,8, on a constaté qu'il existe entre le nombre de dureté obtenu au moyen d'une épreuve à bille en acier, et la résistance à la rupture (en kilogrammes par millimètre carré), un certain rapport constant. Pour ces aciers (Fagersta 30 sur 30 millimètres) laminés, sans aucun traitement à froid, on obtiendra la *charge de rupture* en multipliant le nombre de dureté par 0,346, tandis que pour d'autres aciers, soit trempés, soit travaillés à froid, il faudra chercher d'autres coefficients.

Au moyen de ces épreuves, on pourra donc désormais obtenir des déterminations de résistance dans des cas où l'insuffisance de la matière rendra impossible de se servir des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

essais à la traction, comme, par exemple, on fait de fragments d'une pièce à machine éclatée. Pour les essais de traction que j'ai fait exécuter par M. Axel Wahlberg, directeur du laboratoire pour l'essai de matériaux de l'École royale polytechnique à Stockholm, afin d'en comparer les résultats à ceux obtenus par des épreuves à bille en acier dans le but d'obtenir le coefficient susdit, j'ai fait faire au tour, avec des barres laminées rondes de 30 millimètres, des éprouvettes de 18 millimètres de diamètre. Je ferai observer, au reste, que toutes les expériences, par rapport à ces déterminations en fait d'allongement et de limite d'élasticité apparente, n'ont été faites qu'avec des aciers coulés (Fagersta, 30 sur 30 millimètres) non trempés, sans aucun traitement à froid.

Pour déterminer les *allongements*, on enfoncera dans la surface où se fera l'impression, à une certaine distance, ordinairement de 2 millimètres, d'un des bords latéraux, une petite bille de 5 millimètres, seulement, jusqu'à l'apparition d'une crique minimale, qui

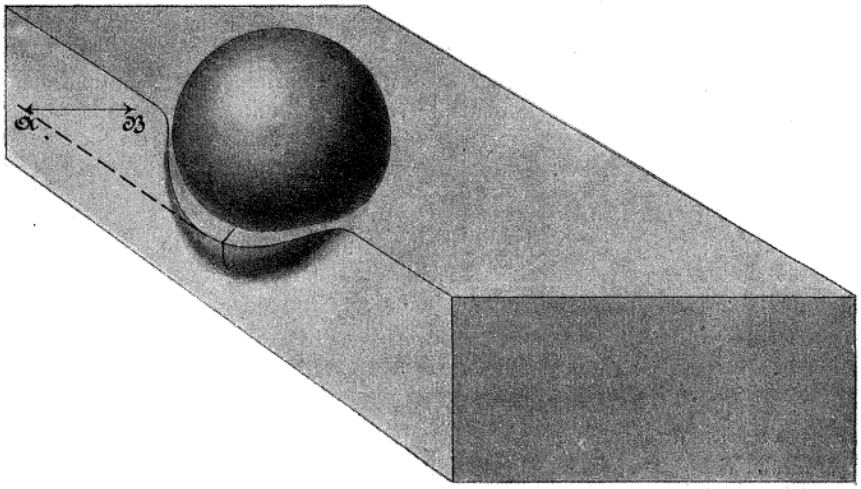


Fig. 4.

se produira dans la partie gonflée du bord (voir fig. 4). Moins dur sera l'acier, plus grand sera ce gonflement (la distance désignée par AB (fig. 4), avant l'apparition d'une telle crique.

Entre la mesure du gonflement ainsi produit dans un acier ou l'autre, il existe aussi un rapport constant, et il suffira donc d'avoir constaté, au moyen d'un essai authentique à la traction, l'allongement d'un certain acier pour se trouver à même de calculer après, en produisant de la manière susdite les gonflements requis, l'allongement de quelque autre acier que ce soit.

Pour déterminer la *limite d'élasticité apparente* (voir fig. 5), on enfoncera de même une bille de 5 millimètres à la distance de 2 millimètres du bord de l'éprouvette, en observant la pression dont on se sera servi pour produire un gonflement à peine perceptible en dehors dudit bord. En préparant d'avance la partie de l'éprouvette où s'observera ce gonflement, de manière à la rendre tout à fait lisse et polie, on n'aura pas de difficulté à apercevoir immédiatement, par le reflet de lumière, même le moindre gonflement qui s'y produirait. La pression exercée pour produire ce gonflement dans un certain acier étant toujours proportionnelle à la limite d'élasticité apparente du même acier, tout comme la pression exercée pour obtenir le même résultat, en fait d'un autre acier quelconque à la limite d'élasticité apparente de celui-ci, on n'aura donc qu'à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

constater, dans un seul cas, l'expression numérique de ce rapport, pour déterminer après, en opérant cette épreuve, par un simple calcul, la limite d'élasticité apparente dans un autre cas quelconque.

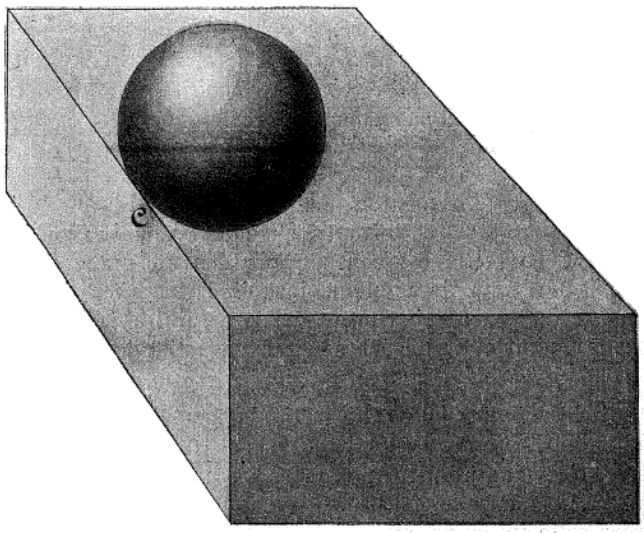


Fig. 5.

Dans le tableau suivant (voir pl. VII), on trouvera les résultats comparatifs de ces essais à la traction et à bille en acier.

Au cours des expériences effectuées afin de développer cette méthode s'offrant avantageusement à tant de buts divers, l'idée m'est venue de me servir aussi de boulets en acier trempé pour déterminer la résistance des aciers à canons de fusil. Jusqu'à présent,

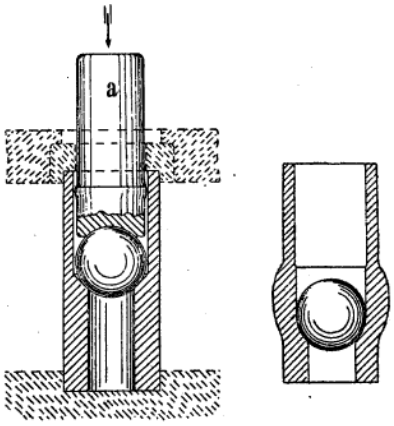


Fig. 6.

on n'a eu recours qu'aux essais à la traction pour déterminer, dans le cas de ces aciers-là, les limites de rupture et d'élasticité apparente, en se servant de l'écrouissage par voie mécanique, soit laminage, soit martelage, pour élever autant que possible ces limites. Il est bien connu que les traitements mécaniques à froid auront l'effet de relever les propriétés de *résistance* et d'*élasticité*, avec une certaine réduction de celle de la *ductilité*, mais on pourrait bien se demander si la supériorité de résistance d'un certain acier, ainsi

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

acquise en sens longitudinal, ce qui est constaté par les essais à la traction, se produira toujours aussi en sens transversal. On a vu des cas où les aciers travaillés à froid, au delà d'une certaine limite, se sont cassés, même spontanément, en sens longitudinal, et ces aciers-là ne seraient guère propres pour fabriquer des canons d'armes à feu. Il s'agirait donc de trouver une méthode d'essai pour déterminer, en fait des aciers qui serviront à cette fabrication, la résistance aux pressions de chocs soudains se produisant d'en dedans la matière et en sens transversal. Dans ce but, j'ai donc fait faire des éprouvettes tubulaires d'une certaine forme (voir fig. 6), afin d'en faire des essais au choc, au moyen d'un boulet en acier trempé (de 10 à 12 millimètres). Pour opérer ces essais, je me sers d'un appareil à mouton (poids de chute : 5 kilogr.), dont les chocs agiront sur le boulet par l'intermédiaire d'une tige cylindrique, appuyant sur ce boulet. Pour le premier choc, je fais tomber le mouton d'une hauteur de 100 millimètres, en élevant la hauteur de chute pour les chocs suivants, chaque fois de 100 millimètres. L'élargissement successif de l'éprouvette est constaté par des mesurages de la circonférence extérieure après chaque coup de mouton, jusqu'à l'apparition du premier signe de rupture qui se produira plus ou moins tôt, selon la nature de la matière. Cette méthode s'est montrée très utile, surtout pour les essais comparatifs des aciers divers.

Je me permettrai de rappeler que cette méthode nouvelle se trouve encore dans le stage des expériences, et, si je me suis enhardi à la mettre, telle quelle, sous les yeux de ce Congrès illustre, c'est que j'espère que, en fait d'une matière que nous embrassons tous d'un vif intérêt, je n'appellerai pas en vain à vous, Messieurs, en vous priant de vouloir bien agréer cette initiative, en m'accordant votre concours et votre collaboration afin d'obtenir de cette tentative, au profit de notre cause commune, des résultats plus positifs, et d'une portée autant que possible universelle.

J.-A. BRINELL.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

VI

SUR LES

DÉFINITIONS DES FONTES, FERS ET ACIERS

COMMUNICATION

Présentée par M. Al. POURCEL

Peut-être le moment est-il venu de réaliser le vœu exprimé au meeting de Dusseldorf, en 1880, par le regretté Dr W. Siemens (*Journal of the Iron and Steel Institute*, 1880, p. 139), d'établir une entente générale sur ce que l'on doit appeler **Fer** et **Acier**. C'est dans l'espoir d'atteindre ce but que la présente note, qui a été élaborée par l'auteur dans un sous-Comité d'Études de la Commission française des Méthodes d'essai, est offerte à la discussion du Congrès international des Méthodes d'essai.

RECHERCHES SUR LEURS DÉFINITIONS

Le fer est employé associé avec le carbone; le fer plus ou moins carburé sert aux usages les plus divers.

Il n'est pas possible de séparer bien nettement les différentes classes de ses composés. On a cependant l'habitude de diviser leur longue série en trois parties : les fontes, les aciers et les fers.

FONTES

C'est le produit fondu brut de la réduction des minerais de fer. La proportion des matières autres que le fer, et où le carbone généralement domine, atteint un chiffre variable. La fusion se fait entre 1050° et 1300° environ.

La fonte ne se laisse pas forger. Quelquefois, cependant, on fait acquérir, *dans une certaine mesure*, à la fonte la propriété de pouvoir subir le travail du marteau; alors on a la fonte malléable, où une partie importante du carbone est à l'état de graphite invisible.

ACIERS ET FERS MALLÉABLES

Ces produits se distinguent de la fonte en ce qu'ils ont généralement [1] moins de carbone et autres éléments étrangers au fer, qu'ils sont malléables et fondent entre 1200° et 1500° environ.

1. Beaucoup de fontes blanches n'ont que de 1,4 à 1,8 de carbone; des aciers naturels en renferment de 1,6 à 2 pour 100

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais on ne s'entend pas sur ce qu'on doit appeler proprement *acier*, d'une part, et *fer* d'autre part.

Première opinion.

En se plaçant au point de vue chimique, les *aciers* sont, dans le sens strict du mot, les composés ferreux malléables ayant une certaine teneur en carbone et caractérisés par l'extrême dureté qu'ils acquièrent par la trempe.

Les fers sont les composés ferreux malléables ayant une moindre teneur en carbone, souvent aussi durs que les *aciers non trempés*, mais ne pouvant pas durcir à l'égal de ceux-ci par la trempe.

Deuxième opinion.

On a proposé d'appeler :

fer, tout produit ferreux malléable et *soudé*;

acier, tout produit ferreux malléable et *fondu*.

On a justement fait remarquer, à ce sujet, la grande influence de la fusion.

Dans les produits ferreux *soudés* formés d'éléments plus ou moins carburés, on retrouve toujours la scorie entre les grains métalliques; la qualité du produit dépend aussi beaucoup de l'ouvrier.

Les produits ferreux *fondus* sont obtenus à haute température; la liquation est complète entre la scorie et le métal. Les éléments formés par refroidissement se sont soudés sans interposition de scorie.

La qualité du produit est ici indépendante de la valeur de l'ouvrier et ne dépend que de la qualité des matières premières. Il en résulte des propriétés particulières qui expliquent pourquoi les métallurgistes américains, anglais, belges, français et autres, ont adopté le nom d'*acier* pour tout métal ferreux fondu.

Les aciers fondus sont faciles à reconnaître en appliquant des méthodes appropriées.

Le fer a une structure où la présence de la scorie peut être reconnue par l'examen de la cassure à l'œil nu ou avec le microscope, soit directement, soit après une opération chimique ou mécanique, tandis que, dans l'acier fondu, il n'y a pas de scorie, ou bien, s'il y en a, elle est localisée.

M. Gruner n'admettait point cette division, à laquelle il faisait l'objection suivante : « Il serait singulier qu'une simple opération physique, la fusion, eût sur les propriétés réelles et le nom d'un métal une plus grande influence que sa nature chimique. »

Il est peut-être permis d'observer, d'après ce qui précède, que l'influence de la fusion sur la nature chimique du métal ne laisse pas d'être assez grande.

Troisième opinion.

La distinction entre le fer et l'acier serait uniquement basée sur la propriété de recevoir ou non la trempe.

Les *aciers* seraient les produits ferreux malléables qui, par une cause quelconque, durcissent par la trempe.

Les *fers* seraient les produits ferreux malléables qui ne durcissent pas sensiblement par la trempe.

Dans la loi sur le tarif des douanes françaises, on voit que les droits sur les aciers ne sont applicables qu'aux aciers qui prennent la trempe; mais on y fait cette remarque : « Les autres aciers sont soumis aux mêmes droits que le fer, quelle que soit la quantité de scories qu'ils contiennent. »

Cette phrase indiquerait bien qu'on admet qu'il y a des aciers qui ne trempent pas. Néanmoins, cette opinion est celle du Comité international réuni à Philadelphie en 1876, et dont faisaient partie MM. Lowthian Bell et L. Gruner, ce dernier comme correspondant. Le fer et l'acier étant ainsi séparés par la trempe, on distinguait ensuite :

1° Le fer *soudé*, *Weld Iron*, *Schweiss Eisen*;

Le fer *fondu*, *Ingot Iron*, *Fluss Eisen*;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° L'acier *soudé*, *Weld Steel*, *Schweiss Stahl*;
L'acier *fondu*, *Ingot Steel*, *Fluss Stahl*.

Ces mêmes divisions sont indiquées dans une ordonnance de janvier 1889, adressée aux chemins de fer allemands, en vue d'établir l'uniformité dans la dénomination des matériaux, fers ou aciers, employés dans l'exploitation des chemins de fer.

Il est bon de remarquer que la trempe n'est pas toujours considérée comme un moyen d'augmenter la dureté de l'acier. Maintenant, dans les aciers nouveaux (qui ont autre chose que du carbone et du fer), certains, au lieu de durcir par la trempe, deviennent plus faciles à travailler[1].

L'ordonnance allemande dit :

« La délimitation entre les matières susceptibles de prendre la trempe et celles qui ne peuvent la recevoir, étant très difficile à établir, on désignera par *acier*, la matière qui donnera une résistance à la traction de 50 kilogrammes et au dessus par millimètre carré, et par *fer*, celle qui restera en dessous de ces conditions. »

Quatrième opinion.

La quatrième opinion est précisément celle qui résulte des lignes précédentes : elle consiste à prendre, pour limite de démarcation entre le fer et l'acier, un chiffre déterminé exprimant la résistance en kilogrammes à la traction.

Cette classification est la plus artificielle de toutes.

CONCLUSIONS

Aucune de ces définitions ne donne un sens précis aux mots Fer et Acier et n'exprime synthétiquement les caractères distinctifs de chacun de ces produits.

La trempe, pas plus que la résistance à la rupture par traction, ne peut différencier le fer de l'acier dans le métal fondu. La trempe, toujours, en modifie la « déformabilité » ou la « douceur » et, quant à la résistance à la rupture par traction, elle peut varier dans de très larges limites suivant la température à laquelle s'est fait l'étirage.

La distinction entre un produit fondu et un produit soudé est, certainement, la plus aisée à établir. C'est l'opinion même du savant métallurgiste allemand, le professeur A. Ledebur, de l'Académie des mines de Freiberg.

M. Ledebur reconnaît que la fusion est la caractéristique adoptée pour différencier le Fer de l'Acier, non seulement en Amérique, en Angleterre, en France et ailleurs (en Suède et en Belgique) mais même en Allemagne où beaucoup d'Usines portent le nom de Stahlwerk (Acierie), tout en ne fabriquant que du métal ne prenant pas pratiquement la trempe [2].

Au Congrès international des Ingénieurs tenu à Chicago, en août 1893, le métallurgiste Campbell, de Steelton, en réponse à une observation faite par le docteur Wedding, de Berlin, émit son opinion en termes formels sur la définition donnée en 1876 par le Comité international, pour distinguer le Fer de l'Acier.

« Avec toute la déférence et le respect que l'on doit, dit M. Campbell, au groupe de métallurgistes qui a donné pour distinguer le fer de l'acier, la formule en usage en Allemagne et dont l'adoption universelle a été préconisée, je déclare avoir toujours considéré cette formule comme basée sur une erreur et pratiquement inapplicable [3]. »

1. Acier au manganèse ; acier nickel.

2. L'association des maîtres de forges allemands a tout d'abord rejeté les définitions relatives au fer et à l'acier *édictées* en 1876, à Philadelphie, par un Comité international de métallurgistes (*Journal of the Iron and Steel Institute* de 1878, p. 592), définitions d'après lesquelles la distinction entre le fer et l'acier serait uniquement due à la trempe, comme il est indiqué plus haut. Mais après le succès de la déphosphoration au convertisseur, en Allemagne, ladite association revint sur sa décision pour des motifs d'intérêt commercial qui ont cessé d'exister aujourd'hui.

3. Voici, du reste, la teneur de l'*Act* approuvé au Congrès des États-Unis le 3 mars 1893 : « Provided that all metal produced from Iron or its ores, *which is cast and malleable*, of whatever description or form, without regard

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En définitive, la seconde opinion qui appelle un produit ferreux malléable du nom d'Acier, quand il est fondu, et du nom de Fer quand il est soudé, bien qu'elle ne donne qu'une idée incomplète des propriétés de chacun de ces deux produits, reste, quand même, la plus nette, la plus synthétique et la presque universellement employée[1].

L'acier poule est du fer cémenté.

L'acier naturel est un fer dur, non complètement affiné, comme l'acier puddlé. C'est par un travail mécanique qu'on essaye de donner l'homogénéité à ces produits.

to the percentage of carbon contained therein, wether produced by cementation, or converted, cast, or made from iron or its ores, by the crucible; Bessemer, Pneumatic, Thomas-Gilchrist, basic; Siemens-Martin or open hearth process, or by the equivalent of either, or by the combination of two or more of the process or their equivalents, or by any fusion or other process which is cast and malleable, excepting what is known as malleable iron castings, shall be *denominated* and *classed as Steel.* »

1. Le Dr W. Siemens, au meeting de Dusseldorf, exprime en ces termes l'opinion des maîtres de forges anglais sur la question : « ...England was adhering to the older one of calling by the name *of Steel*, all malleable metal *that had passed through the fused condition* » (*Journal of the Iron and Steel Institute*, 1880, p. 459).

« ... L'Angleterre a adopté l'antique dénomination qui appelle *acier* tout métal malléable obtenu par une opération de fusion. »

AL. POURCEL.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

VII

SUR

LES ESSAIS DE TREMPE

NOTE

Présentée par M. Georges CHARPY

INGÉNIEUR PRINCIPAL DES USINES SAINT-JACQUES, A MONTLUÇON (ALLIER)

Pendant longtemps les seules conditions imposées par les cahiers des charges aux fabricants d'acier et comportant des essais sur métal trempé étaient relatives seulement à l'acier doux. Ces essais avaient pour but de constater que l'augmentation de résistance produite par la trempe ne dépassait pas une certaine valeur. Depuis quelques années, on tend de plus en plus à utiliser pour la confection de pièces de machines et autres de l'acier trempé et recuit. On est donc conduit naturellement à demander aux métallurgistes de garantir une certaine qualité pour le métal soumis à un traitement de trempe et de recuit, et non pas seulement pour le métal recuit ou brut de laminage et de forgeage.

Mais, en augmentant le nombre des variables qui interviennent dans l'essai, on doit, si l'on veut obtenir des résultats comparables, les définir d'une façon particulièrement précise. A ce point de vue, quelques-unes des conditions actuellement en vigueur donnent lieu à des observations que nous avons rassemblées dans cette note.

Dans un rapport présenté à la Commission des méthodes d'essai, et relatif aux essais de trempe, M. Osmond a rappelé les différentes conditions qui peuvent modifier le résultat produit par la trempe sur un acier déterminé; les principales sont :

1° La température à laquelle l'acier est chauffé;

2° La vitesse de refroidissement, dépendant de la nature du bain de trempe, de sa température, de son volume.

Nous croyons utile de rappeler ici quelques résultats numériques en vue de faire ressortir ces influences.

1° Influence de la température de chauffage sur les résultats de la trempe.

Supposons que l'on opère seulement sur des aciers préalablement recuits à température élevée (900° environ) et refroidis entièrement pour faire disparaître les effets du travail préalablement subi; si l'on trempe successivement dans un même bain des barreaux d'un même acier, chauffés à des températures graduellement croissantes, on trouve que la trempe ne modifie pas sensiblement les propriétés de l'acier, tant qu'elle a lieu à une tem-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pérature inférieure au point critique à l'échauffement a_1 qui est toujours voisin de 700°. Au-dessus de 700°, les propriétés se trouvent nettement modifiées; si l'on apprécie l'effet de la trempe par la résistance à la rupture, on trouve toujours une augmentation rapide entre 700 et 800°.

Pour les aciers ne contenant que du carbone, les autres éléments n'existant qu'à l'état de traces, la résistance atteint son maximum aux environs de 800°, et subit aux températures supérieures une légère décroissance.

Voici, par exemple, les résultats obtenus (après trempe à l'huile sans recuit) sur quatre aciers ayant les compositions suivantes :

ACIERS	C	Si	Ph	S	Mn
N° 1.	0,09	0,01	traces.	0,01	traces.
N° 2.	0,07	0,01	—	0,01	0,14
N° 3.	0,41	0,06	—	0,01	0,03
N° 4.	0,81	0,06	—	0,01	0,04

TEMPÉRATURE DE TREMPE	ACIER N° 1	ACIER N° 2	ACIER N° 3	ACIER N° 4
0	32,1	29,1	50,6	71,7
650°	31,5	30,0	»	»
700°	40,2	40,7	52,4	129,0
750°	40,7	41,8	70,6	127,3
800°	39,8	37,1	69,5	122,0
900°	39,2	»	»	117,7
1000°	39,6	37,8	»	»

Il n en est pas de même quand l'acier contient d'autres éléments, tels que le manganèse ou le chrome, même en petites quantités. La résistance augmente alors à mesure que la température de trempe s'élève. Voici les résultats obtenus sur deux aciers doux contenant, le premier 0,75 de Cr, le second 0,90 de Mn (trempe à l'eau sans recuit).

TEMPÉRATURE DE TREMPE	ACIER N° 1 C = 0,09 Cr = 0,75	ACIER N° 2 C = 0,15 Mn = 0.90
0	33,1	39,0
650°	36.1	46,1
700°	49,2	49,5
750°	52,4	»
800°	61,6	78,2
900°	74,9	84,2
1000°	85,6	102,2

Pour les aciers de fabrication courante, qui sont moins purs que les premiers cités, et qui contiennent moins d'éléments étrangers que les seconds considérés, les résultats fournis par l'essai de traction sont également intermédiaires, c'est-à-dire que l'élévation de la température de trempe produit en général une augmentation de la résistance, mais moins accentuée que pour les aciers au chrome ou au manganèse cités plus haut.

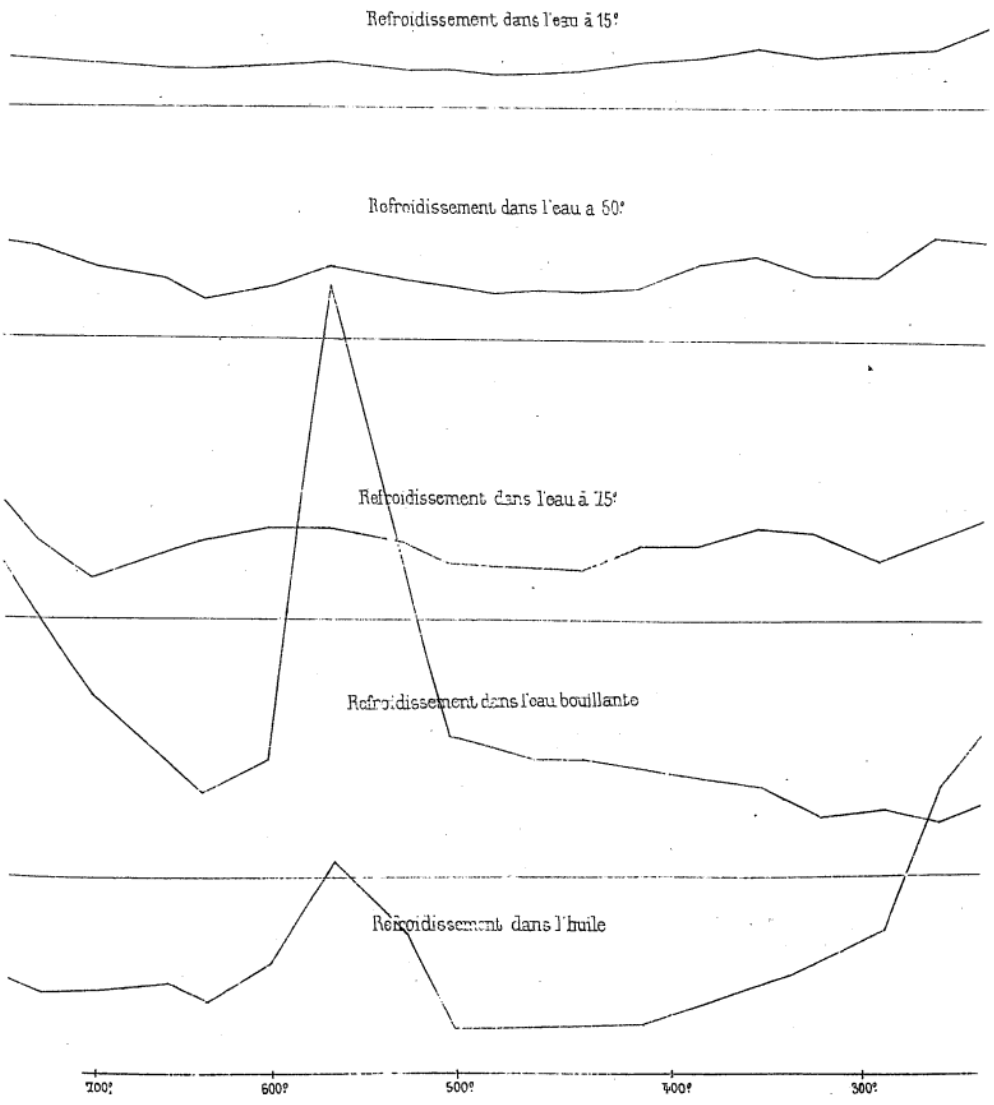
Par exemple, sur un acier Martin mi-dur, contenant environ 0,45 de Mn, nous avons obtenu après trempe à l'eau, sans recuit : à 800°, 164 kilogrammes; à 850°, 175^{kg},4; à 900°, 185^{kg},0.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Influence du bain de trempe.

On sait que la trempe est d'autant plus énergique que le refroidissement est plus rapide dans un intervalle qui va de la température de recalescence à une température pour laquelle le recuit se fait avec une très grande lenteur, soit 200° environ. Les variations de vitesse de refroidissement expliquent les effets bien connus des différents bains de trempe et de la température du bain de trempe ; à ce sujet, qui a son importance au point de vue des essais de trempe, nous citerons quelques résultats mécaniques obtenus en trempant des barreaux d'un même acier chauffés à la même température (800°), dans un même volume d'huile ou d'eau à différentes températures.

BAIN DE TREMPE	RÉSISTANCE	ALLONGEMENT
Eau à 15°	111k,7	0,5
— 50°	95k,0	4,5
— 75°	86k,3	5,5
— 100°	66k,8	17,0
Huile à 15°	92k,1	7,5



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette influence considérable de la température du bain de trempe apparaît également quand on suit la marche du refroidissement d'un fragment d'acier plongé dans divers milieux. Les courbes reproduites ci-contre représentent les vitesses de refroidissement en fonction de la température observées sur un même fragment d'acier, au milieu duquel était fixé un pyromètre Le Chatelier, et que l'on plongeait dans l'eau à différentes températures après l'avoir chauffé à 800°. Les températures sont portées en abscisses et les vitesses de refroidissement en ordonnées; on voit que la recalescence, nullement visible quand on trempe à l'eau froide, devient de plus en plus marquée à mesure que la température du bain de trempe s'élève.

3° Précision avec laquelle on peut reproduire des conditions de trempe avec ou sans appareil de mesure des températures.

La température à laquelle est chauffé l'acier, avant trempe, ayant une influence qui n'est nullement négligeable au point de vue des résultats obtenus, il devient nécessaire de rechercher avec quelle précision on peut évaluer ces températures. Cette évaluation présente une grande précision quand on emploie les pyromètres et principalement le pyromètre thermo-électrique Le Chatelier, mais très souvent on se contente d'évaluer les températures à vue, d'après la couleur de l'acier chauffé, en se basant sur l'échelle pyrométrique de Pouillet.

Cette échelle présente d'assez grands écarts avec les indications pyrométriques; tout récemment, MM. White et Taylor, d'une part, M. Howe, d'autre part, se sont proposé de déterminer, au moyen du pyromètre électrique de M. Le Chatelier, les températures correspondant aux différentes teintes définies par Pouillet. Ils ont ainsi construit deux nouvelles échelles que nous donnons avec celle de Pouillet.

Il résulte du tableau de ces différentes échelles que l'évaluation à vue des températures, d'après l'échelle de Pouillet, n'est exacte, ni au point de vue absolu puisqu'elle présente des discordances de 200° avec le pyromètre électrique, ni à un point de vue relatif puisqu'il n'y a aucune loi reliant les différences observées.

Quant aux échelles de White et Taylor et de Howe, établies toutes deux par comparaison avec le pyromètre thermo-electrique, elles présentent entre elles des écarts relatifs de 50°. Elles donnent une idée de la prècision que l'on peut attendre de mesures faites de cette façon, même par des expérimentateurs exercés.

ÉCHELLE de WHITE ET TAYLOR	ÉCHELLE de HOWE	DIFFÉRENCES avec les OBSERVATIONS de WHITE ET TAYLOR	ÉCHELLE de POUILLET	DIFFÉRENCES avec les OBSERVATIONS de WHITE ET TAYLOR
	R.N. dans l'obscurité 470°			
	— à la lumière du jour . . . . 475°		Rouge naissant . . 525°	
Rouge sombre. . . 566°	Rouge sombre. . . 550°	— 16°	— sombre. . . . 700°	+ 134°
— cerise sombre 655°			— cerise naissant 800°	+ 165°
— cerise. . . . 746°	Cerise franc. . . . 700°	— 46°	— cerise. . . . 900°	+ 154°
— cerise clair. . 843°	Rouge clair . . . . 850°	+ 7°	— cerise clair. . 1000°	+ 157°
Orangé. . . . . 899°			Orangé foncé. . . . 1100°	+ 201°
— clair. . . . 941°			— clair . . . . 1200°	+ 260°
Jaune . . . . . 996°	Jaune franc. . . . 950°	— 46°		
— clair. . . . 1079°	— clair . . . . 1050°	— 29°		
Blanc. . . . . 1205°	Blanc . . . . . 1150°	— 55°	Blanc. . . . . 1300°	+ 95°

Nous avons tenu à mettre le fait en évidence sous une autre forme, en montrant la répercussion qu'il a nécessairement sur les essais de trempe et de recuit. Nous avons fait faire à quatre expérimentateurs différents, tous très exercés à ce genre d'opération, deux séries de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trempes sur des barreaux prélevés dans une même barre d'acier mi-dur. La 1re série comportait seulement une trempe à l'huile au rouge cerise ; la 2e série comportait une trempe à l'eau au rouge cerise suivie d'un recuit au rouge très sombre. Ce sont des conditions prises dans les cahiers des charges de grandes administrations pour la réception de l'acier mi-dur.

Les résultats des essais des éprouvettes ont été les suivants :

NUMÉRO DE L'EXPÉRIENCE		RÉSISTANCE A LA RUPTURE	
		TREMPE A L'HUILE	TREMPE A L'EAU ET RECUIT AU R. S.
		Kilogrammes.	Kilogrammes.
1er observateur.	N° 1	105,5	90,3
	N° 2	100,3	87,0
	N° 3	99,4	89,0
	N° 4	103,3	93,5
	N° 5	105,3	93,9
2e observateur.	N° 1	113,4	92,0
3e observateur.	N° 1	102	102,9
4e observateur.	N° 1	104,3	96
	N° 2	119,4	99,3
Différence maxima		19,1	15,9

On voit que la différence des résultats obtenus par un même expérimentateur (très exercé) est de 6kg,1 pour la 1re série, et 6kg,9 pour la 2e série, mais qu'entre les différents expérimentateurs, opérant tous dans les mêmes conditions, la différence atteint 19kg,1 pour la 1re série et 15kg,9 pour la 2e série.

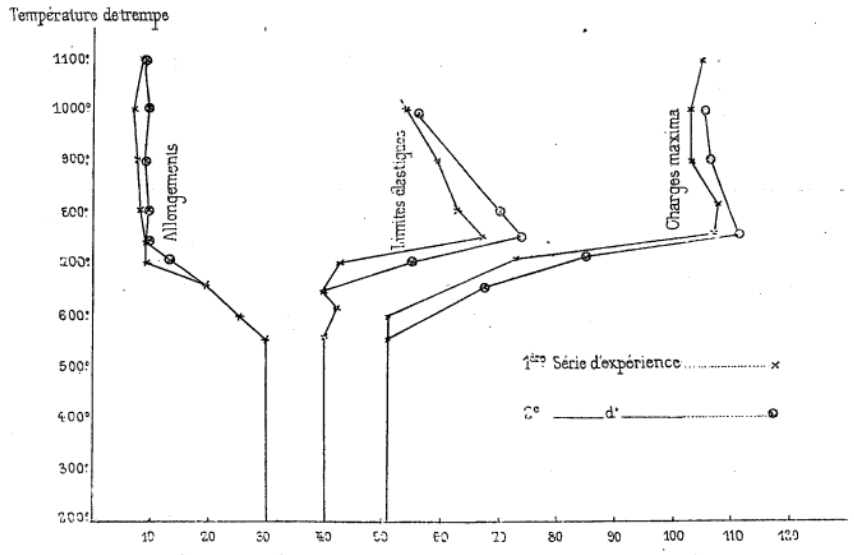
On a effectué sur le même métal des essais après trempe à l'huile à 800°, et après trempe à l'eau à 800° et recuit à 550° en déterminant les températures au moyen d'un pyromètre. Les résultats obtenus sont les suivants :

	TREMPE A L'HUILE	TREMPE A L'EAU ET RECUIT
N° 1	86k,4	91k,9
N° 2	87k,1	92k,4
N° 3	87k,7	93k,5
N° 4	85k,5	91k,7
N° 5	89k,7	94k,8
Différence maxima	4k,2	5k,1

L'emploi du pyromètre donne comme on voit une précision assez grande ; mais sa supériorité apparait surtout quand on considère des opérations faites indépendamment par des expérimentateurs différents.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure suivante donne, à titre d'exemple, des résultats obtenus sur le même acier à deux années d'intervalle, par des expérimentateurs indépendants opérant avec un outillage différent. Les courbes se rapportent à un métal à 0,40 de carbone, trempé à différentes températures. Les écarts entre les résistances observées après trempe à une même température entre 750 et 1000° ne dépassent pas 3 kilogrammes.



CONCLUSIONS

Il n'entre pas dans le cadre de cette note de discuter comparativement les cahiers des charges qui imposent des conditions d'essai après trempe. En les rapprochant, on verrait que sous leur forme actuelle ils présentent un certain nombre de contradictions qui conduiraient à fabriquer pour chaque cas un acier tout à fait spécial, ce qui n'est certainement pas dans l'esprit des ingénieurs qui les ont rédigés. Nous avons voulu seulement attirer l'attention sur la nécessité qu'il y a, pour donner à ces essais, dont l'utilité est incontestable, toute la valeur qu'ils comportent, de définir d'une façon très précise les différentes conditions de l'essai, et notamment d'indiquer les températures de trempe en degrés centigrades et non au moyen des indications de couleur, qui peuvent donner lieu à des contestations.

GEORGES CHARPY.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

VIII

CAHIERS DES CHARGES

ET

MÉTHODES D'ESSAI INTERNATIONALES

POUR LE FER ET L'ACIER

AU POINT DE VUE DE L'INGÉNIEUR AMÉRICAIN

RAPPORT

Présenté par William R. WEBSTER

INGÉNIEUR CONSEIL ET INSPECTEUR D'USINES. M. AM. SOC. C. E. M. AM. SOC. M. E. M. AM. INST. M. E.

Bien que ce Congrès n'ait pas pour but l'adoption de conclusions générales sur les sujets traités, on peut espérer qu'il produira, grâce aux mémoires et aux discussions, des résultats constituant un bienfait durable pour les fabricants et les consommateurs d'acier dans tous les pays. Il préparera sans doute la voie pour l'adoption de meilleurs procédés de fabrication, de meilleurs cahiers des charges et de meilleures méthodes d'essai, en faisant justice de quelques-unes des anciennes idées sur l'acier qui sont plus qu'inutiles. Les documents dont nous disposons sont assez importants pour justifier ce que nous avançons ; de plus, aucun moment ne sera plus favorable que le présent pour entreprendre ce travail, car tous les intéressés se réunissent ici sur un terrain commun pour discuter librement les résultats de recherches récentes, les relations qu'elles ont entre elles et avec les procédés de fabrication ainsi que leurs rapports avec les méthodes d'essai et les cahiers des charges. Ceci amènera l'étude de beaucoup de questions nouvelles et fera présenter les anciennes sous un nouveau jour. Le travail à faire pourrait être comparé au nettoyage d'une maison, il faut nous débarrasser d'une quantité de vieilles inutilités qui se trouvent actuellement dans nos cahiers des charges et de méthodes de « coup de pouce » dont on se sert dans notre fabrication.

Quand ce travail préliminaire aura été fait, il sera possible d'établir des cahiers des charges raisonnables et justes au double point de vue du fabricant et du consommateur.

Essayer de procéder autrement serait perdre son temps, car nous devons commencer par établir de bonnes fondations. Mais, alors même que des cahiers des charges et des méthodes d'essai convenables auront été adoptés, on ne pourra pas les regarder comme définitifs, car il sera nécessaire de les changer de temps en temps pour les tenir à la hauteur des progrès que feront nos connaissances.

Primitivement les fabricants n'admettaient pas que les procédés de fabrication et la composition chimique de l'acier pussent avoir une influence sur la nature du métal fini, ils prétendaient « que l'ingénieur n'avait pas à s'en occuper du moment que les essais sur le métal fini donnaient des résultats satisfaisants ». Ils étaient aussi d'avis de négliger complètement les conditions de composition chimique. Mais ce temps est passé et les fabri-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cants sont maintenant disposés à discuter sans arrière-pensée avec les ingénieurs et les savants tous les points qui touchent à leurs matériaux, procédés de fabrication ou cahiers des charges, et tout le monde gagnera à un échange d'idées sur ces grandes lignes. Pour provoquer une discussion complète et une coopération cordiale, il suffit de faire ressortir le but pratique qu'on se propose et les grandes lignes à suivre. Ceci est rendu évident par l'exemple de l'Association internationale pour l'essai des matériaux et des premières Conférences, qui ont travaillé pendant une quinzaine d'années à l'unification des méthodes d'essai sans recevoir de grands encouragements des fabricants américains, qui pensaient qu'il était inutile d'ajouter des raffinements additionnels aux méthodes d'essai, sans apporter les changements correspondants dans les cahiers des charges. Mais maintenant que l'Association internationale a pris en mains la question des cahiers des charges internationaux, nos fabricants s'y intéressent vivement et coopèrent par tous les moyens possibles à ce travail. Ce grand changement s'est fait dans les deux ou trois dernières années ; et les travaux sur les méthodes d'essai et l'introduction de cahiers des charges types avancent maintenant la main dans la main, comme cela doit être.

A l'heure actuelle, on ferait positivement un pas en arrière si on abandonnait les conditions chimiques dans nos cahiers des charges, car nous apprenons chaque année à en mieux connaître la valeur. Enfin un ingénieur n'essaye pas chaque pièce, c'est d'après l'essai fait sur une partie qu'il accepte le tout. Pour qu'on puisse avoir confiance dans les résultats de ces essais, il faut partir d'un acier de même composition chimique et employer une même méthode de chauffage, de laminage, ou de forgeage, de façon à obtenir un même résultat pour l'acier fini. On sait cela maintenant mieux que jamais. Pour la détermination des conditions de composition chimique on devra s'inspirer des résultats des dernières études théoriques et aussi des expériences pratiques des fabricants. Les tolérances doivent être assez grandes pour ne pas imposer au fabricant d'acier d'inutiles ennuis, mais assez restreintes aussi pour constituer un contrôle complémentaire de l'essai physique de l'acier. On devra, bien entendu, prendre en considération les dimensions finales auxquelles la pièce aura été amenée par le laminage, le forgeage ou le moulage et aussi les recuits ou autres traitements auxquels elle doit être soumise.

Les savants rendent de grands services de plusieurs genres. Ils ont introduit, avec avantage, des méthodes plus précises pour les déterminations chimiques et, à présent, ils aident beaucoup à l'adoption de méthodes uniformes, pour les essais physiques. Ceci doit être encouragé, car, sur beaucoup de points, les méthodes très différentes qu'on emploie maintenant pourraient être unifiées avec avantage.

Mais on ne doit pas attendre trop de l'unification des méthodes d'essai physique. Les différences qu'on remarque souvent dans les essais faits sur ce qui paraît être le même acier, ne tiennent pas tant à des erreurs provenant des méthodes employées qu'à d'autres causes. Ceci est prouvé par les récents travaux sur l'action de la chaleur sur l'acier, qui ont montré que de grandes différences dans la structure d'une même pièce d'acier étaient dues à la seule action de la chaleur à laquelle la pièce avait été soumise pendant le travail et que le simple pliage ordinaire suffisait pour faire constater ces changements; et d'autre part, grâce à des évaluations plus minutieuses de la température faites au pyromètre, et à des examens au microscope, on a constaté que des changements se produisaient pour des différences de température si minimes qu'on les eût considérées autrefois comme sans importance. D'autre part, quelques-uns de nos premiers fabricants d'acier connaissent si bien ces changements et l'importance de régler la température, qu'ils se servent de pyromètres dans leur travail de tous les jours (ils emploient le microscope pour contrôler les résultats, et aussi pour étudier les cas normaux) et trouvent qu'ils rentrent bien dans les dépenses occasionnées par ces travaux. Les résultats supérieurs qu'on peut obtenir au moyen du bon emploi de la chaleur dans la fabrication de l'acier, forgeage, recuits, etc., étant connus des ingénieurs, tous les fabricants devront perfectionner leurs méthodes et leurs produits sous ce rapport quand cela sera reconnu nécessaire.

Primitivement, ces différences dues à l'emploi de la chaleur dans les résultats physiques des essais étaient si peu comprises que beaucoup de personnes, qui essayaient de trouver une relation entre la composition chimique et les propriétés physiques de l'acier, étaient découragées par les résultats contradictoires qu'elles obtenaient et abandonnaient le problème. Ce sujet a toujours présenté pour moi le plus grand intérêt.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il y a quelques années, alors que j'étais au service d'une de nos grandes aciéries, je trouvai nécessaire d'améliorer les méthodes de classement de l'acier, je travaillai à cette question pendant trois ans et je réussis à appliquer les résultats obtenus à la pratique d'une façon très utile, de la manière suivante :

Un échantillon d'une « coulée » donnée d'acier était analysé pendant que l'acier était dans la fosse; à l'aide de cette analyse on évaluait la résistance à la traction, et on laminait l'acier pour l'exécution des commandes auxquelles il convenait le mieux (en tenant compte, bien entendu, des dimensions de la pièce finie). On trouva que dans la plupart des cas les pièces finies remplissaient avec succès les conditions les plus sûres. Quand la coulée d'acier ne donnait pas les résultats attendus, certaines indications permettaient de remonter à la source de la perturbation, et on y portait remède. Cette étude serrée de la composition chimique et de la conduite de la chaleur pendant le travail amena des résultats qu'on eût auparavant considérés comme impossibles à réaliser. Par l'ancienne méthode de travail, on laissait refroidir la coulée, pendant qu'on laminait un lingot aux dimensions définitives pour y découper des éprouvettes. Avec la nouvelle méthode, on put laminer tout l'acier à ses dimensions définitives sans lui laisser perdre sa chaleur de coulée, de sorte qu'on fait une grande économie en évitant les dépenses de réchauffage et de manutention. Les rebuts sont aussi moins nombreux qu'autrefois. Beaucoup de fabricants emploient actuellement la méthode chimique pour classer leurs aciers. Cela a été rendu possible par l'emploi des méthodes rapides de détermination chimique; tous les efforts qui tendent à perfectionner ces dernières devraient être encouragées, car elles ont une grande importance pour les fabricants d'acier.

Au cours de mes recherches, j'ai été conduit à consulter les ouvrages de beaucoup d'autres personnes qui ont étudié l'acier. J'ai trouvé qu'on pouvait, sans grand inconvénient, suivre les uns ou les autres, car j'ai été promptement obligé de considérer les résultats dans leur ensemble, et les uns avaient avec les autres beaucoup de points communs. Ce sont les comparaisons auxquelles donnaient lieu ces recherches qui rendaient le problème si intéressant et si instructif. D'autres l'ont étudié depuis, et aujourd'hui nous pouvons distinguer, bien mieux que nous ne l'avons jamais fait antérieurement, les effets de la composition chimique sur l'acier fini, ainsi que les effets dus à l'action de la chaleur. Je ne veux pas dire que la valeur qu'on attribue à chaque élément soit exacte, car il reste des progrès à faire; mais je dis que tout tend à montrer que le vrai point de départ pour le travail que nous avons à faire est la relation entre la composition chimique et les propriétés physiques, en tenant compte de l'action de la chaleur dans le travail et du travail mécanique; nous n'avons jusqu'ici que très peu de renseignements sur la façon dont les changements dus à la chaleur sont modifiés par le travail mécanique. C'est pour le moment le champ de recherches le plus important; et il n'est pas douteux qu'on trouvera des moyens de faire des études complètes sur les grandes quantités d'acier qu'on emploie tous les jours. Si on le fait, on trouvera que l'importance du temps en fonction de la température est bien plus grande qu'on ne l'admet généralement. A ce sujet, je prends la liberté de citer l'une de mes études précédentes[1] :

« On a objecté que le chimiste ne donne que le carbone présent dans l'acier et non l'état dans lequel il existe et que nous ne pouvons espérer prédire, au moyen de ce chiffre total, ce que seront ses effets physiques, car dans un cas nous pouvons avoir plus de carbone durcissant que dans un autre pour la même quantité totale de carbone. Cette objection n'est pas si importante qu'elle en a l'air, car l'état sous lequel se trouve le carbone dépend beaucoup de la façon dont la chaleur a été conduite, et il est encore modifié par le travail du laminage; en conséquence, si nous prenons des aciers de qualités données, et que nous déterminions par expérience les effets produits sur les propriétés physiques par des chaudes et des forgeages différents, nous avons immédiatement la réponse au lieu d'attendre que le chimiste ou le « microscopiste » puisse nous donner la proportion du carbone durcissant. Nous savons aujourd'hui qu'à mesure que la proportion de carbone augmente, les différences dues à l'emploi de la chaleur ou à la température

1. The relationsbetwe en the Chemical Constitution and the Physical Character of Steel. *Am. Inst. Mining Engineers*, Volume 28 — 1898.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de finissage au laminoir sont plus grandes qu'avec les aciers peu carburés. Ceci est certainement dû à un plus grand changement dans l'état du carbone qui s'y trouve. Il faut, en conséquence, un peu plus de marge entre les limites supérieures et inférieures de résistance totale, dans les cahiers des charges, et plus d'attention en ce qui concerne le chauffage et la température de finissage au laminoir pour les aciers supérieurs. L'examen microscopique rendra, bien entendu, les plus grands services et nous donnera des renseignements précis sur bien des points sur lesquels nous avons encore des doutes. »

A notre époque d'esprit pratique, on demandera quelle valeur a tout cela, et est-ce la peine de nous inquiéter davantage de ces questions? Nous répondrons que le fabricant d'acier compte de plus en plus, chaque année, avec les points que nous avons discutés, et que l'ingénieur devrait savoir ce qu'il fait quand il indique des limites de composition et de résistance dans ses cahiers des charges. On doit s'étonner de rencontrer aujourd'hui des spécifications dans lesquelles les conditions d'essai chimique ne concordent pas du tout avec la résistance totale. Ceci n'a pas de très grands inconvénients dans les commandes ordinaires données dans le pays, car il est facile d'y faire apporter les modifications nécessaires, mais dans les spécifications provenant de chemins de fer étrangers, ou d'ingénieurs qui se trouvent au loin, relatives à un matériel d'exportation, c'est une affaire tout à fait différente. On n'a pas le temps de correspondre sur des questions de cet ordre et le receveur est obligé de rebuter des fournitures qu'il sait être très bonnes. Elles peuvent donner aux essais physiques des résultats meilleurs que ceux qu'on demande, mais ne pas remplir les conditions d'analyse chimique de la spécification en question, bien qu'elles soient de nature à remplir les conditions d'essai physique aussi bien que celles d'analyse chimique des meilleurs ingénieurs et des principales Compagnies de chemins de fer de ce pays.

On a fait autrefois beaucoup d'objections à cette méthode de classification des aciers par la composition chimique et même maintenant, que l'usage en est entré dans la pratique journalière, on entend encore soutenir qu'on ne peut pas s'y fier, malgré tous les faits qui prouvent le contraire. La question ramenée à sa forme la plus simple se résume à ceci : supposez que les livres d'une usine donnée montrent qu'une coulée d'acier d'une composition donnée, laminée suivant un certain profil d'un demi-pouce d'épaisseur, ait donné 65000 livres de résistance totale avec de bons allongements et de bons pliages; si on a dans les mêmes ateliers une autre coulée d'acier de la même composition chimique et si on a besoin d'une certaine quantité de ce même profil d'un demi-pouce donnant 65000 livres, cette seconde coulée, laminée comme la première, doit donner les mêmes résultats. Presque tout le monde sera d'accord sur ce point, mais, bien entendu, vous ne pouvez être sûr de vous procurer de l'acier qui ait la même composition chimique que celui qui a été laminé en premier et, même dans ce cas, vous pourriez avoir à le laminer pour faire des pièces de différentes épaisseurs. Il devient donc nécessaire de faire une interpolation en donnant à chaque élément un coefficient de résistance par chaque 0,01 pour 100 et aussi de tenir compte de l'épaisseur du profil à laminer. Si nos observations étaient assez étendues, et si les résultats pouvaient être mis sous une forme facile à consulter, il ne serait pas nécessaire de faire des interpolations, mais il n'est pas possible de résoudre tous les cas autrement.

Il est bien entendu qu'on ne doit pas trop attendre de cette méthode et qu'elle ne dispense pas les fabricants des essais ordinaires à la traction et au pliage sur les pièces finies, mais elle rend les plus grands services au fabricant et au receveur en leur permettant de contrôler l'uniformité de l'acier. Mais il n'est pas nécessaire d'attendre qu'on ait trouvé la solution complète de ce problème compliqué. En faisant un usage convenable, pendant qu'on continue les recherches, des résultats déjà obtenus, il est possible d'améliorer beaucoup les matériaux et les méthodes de travail. Beaucoup de nos meilleurs observateurs sont des fabricants d'acier et ils ont déjà montré ce qu'on peut faire dans cette voie en appliquant pratiquement les résultats de leurs travaux. Tous les services n'ont pas fait les progrès qu'ils pourraient avoir faits, mais cela viendra et sera le résultat de ce que nous faisons en ce moment.

Dans mes études, j'ai trouvé que la première chose à examiner était les relations entre les propriétés physiques de l'acier d'une même coulée laminé suivant des profils de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

différentes épaisseurs, et aussi les résultats donnés par des profilés de même épaisseur dont le laminage avait été fait dans des conditions différentes de température finale, etc. Ceci a conduit à faire un grand nombre d'expériences intéressantes et a montré la difficulté qu'il y a à régler l'importance des réductions de section à chaque passe et la température de finissage. Les hommes étant payés à la tonne font naturellement tous leurs efforts pour produire beaucoup sans s'inquiéter des raffinements du laminage. Il n'est pas rare de voir les cylindres produire ce qu'ils appellent une seconde chaude de laminage. On peut apprécier à la première ou la seconde passe les conditions particulières du bloom, et s'il est bien chauffé et mou on fait dans les passes suivantes des réductions aussi grandes que possible. On arrête presque le laminoir universel. Ce travail excessif de grandes réductions rend la surface du lingot plus chaude qu'elle n'est dans les premières passes, le dégagement de chaleur provenant du travail étant très grand et le métal se trouvant réduit de section et allongé promptement, l'intérieur surchauffé se trouve amené à la surface sans avoir eu le temps qu'on lui donne ordinairement pour refroidir. L'acier ainsi traité est toujours détérioré et peu importe la température à laquelle il a été fini, il n'est jamais aussi bon que quand il a été laminé à petites passes depuis le commencement. Le mal ne provient pas de ce que le lingot a été porté dans le four à une température excessive, car deux lingots de même dimension pris dans le même four peuvent être amenés à donner des résultats différents, suivant la manière dont ils sont laminés même quand la température finale de finissage et le profil des pièces sont les mêmes. Ce point n'a pas attiré toute l'attention qu'il mérite, car on peut lui attribuer quelques-unes des différences dans la manière dont se comporte l'acier, qui n'ont pas été expliquées par la composition chimique, ou la *réduction totale* au laminoir, ou la température de finissage. Le vieil adage : « Tout le travail employé pour laminer l'acier à haute température ne change que sa forme sans modifier sa structure », devra être modifié s'il se produit une seconde chaude, car cela fait certainement plus que changer la forme de la masse.

A mesure que les dimensions de la pièce d'acier à laminer sont augmentées, les difficultés sont plus grandes pour régler la température de finissage, car les grosses masses contiennent bien plus de chaleur interne, et l'acier de la meilleure composition chimique peut être rendu cassant et inutilisable (dans cet état) par un finissage à trop haute température. Ces difficultés sont encore augmentées si on essaye de laminer de grosses sections sur un laminoir faible; mais tout ce qu'il y a de plus mauvais est une forte section d'acier à très forte teneur de carbone laminé sur un laminoir faible.

Quand on lamine des profilés ou des plats dans des laminoirs à cannelures, la réduction afférente à chaque passe est réglée, et les blooms employés sont aussi grands que possible pour régler la température de finissage et réaliser ce que l'expérience a montré donner les meilleurs résultats. Mais, même dans ces conditions, pour les fortes sections, il est nécessaire de mettre un temps d'arrêt entre les passes, pour que le finissage ne se fasse pas à trop haute température. Pour les grosses tôles, nous trouvons qu'on obtient de bien meilleurs résultats en prenant de petites passes et en finissant à basse température; on produit ainsi une bonne matière sur laquelle on peut compter, tandis que, sans ces précautions, les tôles ont un grand grain grossier et ne remplissent pas les conditions.

Tout le monde connaît les changements qui se produisent dans les propriétés physiques de l'acier, et le gros grain grossier qui se forme quand il est chauffé à une température trop élevée et qu'on le laisse refroidir sans le travailler; l'étendue du changement dépend de la composition de l'acier et de la manière dont se fait le refroidissement. Nous savons aussi que quand l'acier qui a été ainsi traité s'est refroidi, on peut le faire revenir en le chauffant à une faible température et en le recuisant; cela rompt la structure grossière. On sait bien que le travail mécanique du forgeage ou du laminage sur cet acier chaud, continué jusqu'à une température assez basse, rompt aussi le grain grossier et donne un métal à grain fin et résistant, toujours recherché. Pour produire les meilleurs résultats, le traitement doit être réglé sur la qualité de l'acier qu'on travaille. Dans l'application, peu importe que l'acier passe du grain fin au gros grain pendant l'élévation de température, ou que ce changement se fasse, comme le prétend M. Sauver, pendant le refroidissement. Je suis aussi curieux que quiconque de savoir à quel moment le changement se produit et tout ce qui le concerne; mais le point dont l'importance est capitale est de travailler

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'acier de telle façon qu'on ne le mette pas en service avec un gros grain. On sait très bien comment on produit le changement et comment on le corrige, cependant, on néglige tous les jours de bien des manières les indications données par ces faits. Prenez, par exemple, les plaintes des clients d'une grande aciérie, les recherches que vous ferez montreront que plus de 90 pour 100 des ennuis sont dus à une mauvaise conduite de la température, soit au laminoir, soit dans les ateliers suivants. Il en résulte qu'il est évident que le métal est souvent détérioré dans l'usine. Et pour obtenir les meilleures structures, il est tout aussi nécessaire d'examiner les méthodes suivies dans les ateliers avec autant de soin que les méthodes d'essai et les cahiers des charges. Si cela était fait, *nous n'entendrions plus parler des prétendues « mystérieuses défaillances de l'acier »*.

Dans mes fonctions actuelles d'ingénieur conseil et d'ingénieur inspecteur représentant les consommateurs d'acier dans mon pays et à l'étranger, j'ai rencontré beaucoup de spécifications dans lesquelles les exigences physiques et chimiques étaient en contradiction. Il ne faut pas s'en étonner. Cela est dû en partie, sans doute, à ce qu'on fait usage de renseignements donnés par des savants, sans se rendre compte suffisamment de leur influence sur ceux qui sont donnés d'autre part par les fabricants et les hommes pratiques. Dans d'autres spécifications, on peut trouver que les manufacturiers d'un district donné ont réussi à faire adopter des conditions qui excluent les concurrents d'un autre district. Dans quelques cas, on a pris des morceaux de deux bonnes spécifications pour en faire une troisième qui est, pour ne rien dire de plus, inconséquente avec elle-même. Cet état de choses n'est pas surprenant quand on pense que l'acier de construction est relativement un nouveau métal, et qu'on n'a jamais réalisé un échange d'idées aussi complet et aussi libre que celui qu'on cherche à amener dans ce Congrès. Pour tâcher d'amener la discussion sur quelques-uns de ces points, je citerai des faits relevés dans les cahiers des charges, procédés de fabrication et méthodes d'essai employés à ce jour. La discussion elle-même en fera certainement surgir beaucoup d'autres, d'égale importance.

Les méthodes d'essai ne recevront pas dans ces remarques la première place qu'elles méritent, puisqu'elles seront traitées à fond dans d'autres communications.

1. Dans la fabrication des grosses tôles, il y a des chances de malfaçon, du fait de leur achèvement au laminage à trop haute température. Il n'est pas rare d'essayer de faire accepter ces tôles d'après des essais prélevés sur des tôles plus minces laminées à l'aide d'acier de la même coulée, ou quand on fait les essais sur les grosses tôles d'admettre une tolérance sur l'allongement ou le pliage. Le mieux serait, sans doute, que ces tôles exceptionnellement lourdes fussent recuites, mais que le recuit ne soit pas fait comme il était dit dans une spécification qui m'a été envoyée il y a quelque temps, d'après laquelle, « toutes les pièces doivent être recuites en partant de la chaleur du laminoir avant d'avoir eu le temps de refroidir ».

Or, ceci ne constitue pas du tout un recuit, c'est seulement un refroidissement lent qui rendra toute tôle ou tout gros profilé fini à trop haute température plus mauvais qu'il n'aurait été sans lui, car il augmente les dimensions des grains et rend l'acier plus cassant. On ne peut pas donner trop d'importance à ce sujet, car beaucoup d'acier a été traité de cette manière dans les forges et les ateliers au laminage, au forgeage, à l'emboutissage, etc. A ce propos, les recherches faites dernièrement sur l'emploi de la chaleur dans le travail de l'acier ont montré *l'intérêt qu'il y a à permettre au métal de se refroidir avant d'être soumis à la chaleur du recuit*, mais ce fait important n'a pas été signalé clairement aux fabricants et aux chefs de fabrication. Si ce Congrès n'avait d'autre résultat que d'attirer sur ce point l'attention des fabricants, ingénieurs et consommateurs d'acier, et de les convaincre qu'il y a généralement des progrès à apporter dans la manière dont on fait les recuits, ses efforts seraient complètement justifiés.

2. Les essieux, bandages, pièces forgées ou fondues doivent-elles être recuites ou non? On prétend que quand une pièce doit être recuite, il y a tendance de la part du fabricant à employer une qualité d'acier inférieure que le recuit améliorera assez pour qu'il subisse les essais physiques imposés. Ceci n'est qu'une raison de plus pour imposer des conditions chimiques convenables; car, quand celles-ci sont spécifiées, la question est ramenée à l'étude des résultats qu'on obtient en service en employant du bon acier avec ou sans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

recuit. Ceci fera l'objet d'un sujet de discussion important sur lequel on peut dire beaucoup en faveur du recuit; cependant, dans bien des cas, on prétend obtenir de bons résultats sans recuit et quelques spécifications ne le permettent pas, tandis que d'autres le demandent. Cette confusion provient, sans doute, des résultats obtenus par l'usage de mauvaises méthodes de recuit et du manque d'indications sur la température et le temps nécessaire pour recuire différentes qualités d'acier.

3. On spécifie habituellement des pliages d'éprouvettes trempées et on considère que c'est là un critérium important de la qualité de l'acier; on ne devrait jamais s'y fier, à moins de faire aussi des pliages à froid sur le même métal, pour les raisons suivantes : Un morceau d'acier doux qui a été détérioré par un finissage au laminoir à trop haute température ne donnera pas de bons résultats au pliage à froid, tandis qu'un autre morceau du même acier, chauffé et trempé à l'eau, pourra être plié à bloc. Le pliage à froid ferait refuser, tandis que le pliage de l'éprouvette trempée ferait accepter. Ceci est dû, d'une part, à ce qu'en chauffant le métal pour le tremper le gros grain est changé par le recuit et, d'autre part, à ce que ce même métal ne contient pas assez de carbone pour tremper. Cela paraît si évident qu'on se demande comment on n'a jamais pu omettre un pliage à froid; cependant tel est le cas et on a accepté des métaux très médiocres sur des essais de pliage d'éprouvettes trempées.

A ce propos, je citerai la réponse suivante de M. J. E. Stead à une observation faite sur sa note « sur la structure cristalline du fer et de l'acier » (*Journal of the Iron and Steel Institute*, n° 1, 1898).

« La machine dont on se sert pour faire les essais mécaniques est incapable de mettre en évidence l'effet affaiblissant du gros grain; l'essai par percussion est infaillible et très utile. Il est possible de faire passer le gros grain à l'état de fibre sur la machine à essayer en tirant bien régulièrement, mais un coup brusque peut le faire casser en deux plus facilement, ce qui ne se produirait pas avec de l'acier de bonne qualité s'il était à grain fin. »

4. La tendance est d'insister pour que les éprouvettes aient une longueur de 8 pouces (203 millimètres); et dans quelques cas, pour les obtenir, on a recours à des procédés qui sont loin d'être satisfaisants. Par exemple dans les grosses pièces de forge un bout est forgé à la dimension de 1 pouce, 1 pouce 1/2 ou 2 pouces carrés, dans d'autres cas, après avoir essayé un bandage au mouton, on en coupe un morceau puis on le chauffe pour le redresser, de façon à obtenir la grande éprouvette. Dans chacun de ces cas, les échantillons essayés ne représentent pas l'acier tel qu'il est employé et on aurait pu se procurer des éprouvettes de 2 pouces (50 millimètres) de longueur utile qui auraient donné des renseignements exacts sur l'acier tel qu'il est employé. Ces éprouvettes courtes sont à recommander dans des cas comme ceux-là et sont souvent imposées. Il n'est pas douteux que leur usage deviendra général un jour ou l'autre. Mais pour les tôles, les barres et les profilés, les éprouvettes plus longues sont préférables et la plupart de nos chiffres sont basés sur les résultats qu'elles donnent.

5. Dans la pratique, on tient compte des différentes épaisseurs dans l'évaluation de l'allongement en prenant une jauge de 8 pouces pour les épaisseurs moyennes et des jauges plus courtes pour les tôles plus épaisses et plus minces. Ceci tend à donner en apparence la même valeur à l'allongement. Il vaut mieux spécifier que l'allongement doit être mesuré sur 8 pouces dans tous les cas et faire une réduction pour les tôles les plus épaisses et les plus minces.

6. On fait généralement entrer la striction en ligne de compte, et beaucoup de personnes la considèrent comme la meilleure indication de la qualité de l'acier. Ceci peut être vrai quand on fait usage d'éprouvettes rondes, mais avec les éprouvettes rectangulaires ordinaires de différentes largeurs et épaisseurs, avec leurs coins carrés, les résultats n'indiquent pas toujours la valeur du métal.

7. A l'origine, une limite d'élasticité égale à la moitié de la résistance totale était la pratique courante, mais maintenant on demande souvent des résultats bien plus élevés. Ceci provient de l'emploi, dans la précipitation du travail, de méthodes peu précises donnant des résultats trop élevés.

8. Dans quelques cas, en spécifiant la résistance limite, on ne donne que la limite infé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rieure, en se fiant aux autres conditions relatives à l'allongement, à la striction et aux pliages pour proscrire l'emploi d'un métal trop dur. Mais il peut se produire de grandes différences dans la résistance totale, même quand on a pris beaucoup de soin pour déterminer les autres élements comme moyen de contrôle; et il vaut bien mieux indiquer la limite supérieure et la limite inférieure dans tous les cas, en choisissant ces limites de façon qu'elles correspondent à ce qu'on peut attendre du meilleur acier des différents genres. Dans cet ordre d'idées, les difficultés pratiques qu'on rencontre en laminant de l'acier à haute teneur de carbone peuvent être reconnues et compensées comme il convient, mais il ne faut pas le faire en omettant la limite supérieure dans la spécification.

Dans tout ce travail, nous ne pouvons perdre de vue les difficultés pratiques avec lesquelles les manufacturiers ont à compter et la meilleure manière de montrer que nous apprécions le bon travail qu'ils ont déjà fait et de les encourager à faire de nouveaux efforts, est de cesser de couper les cheveux en quatre dans nos spécifications et nos méthodes d'essai. En nous bornant aux points essentiels, de l'importance desquels nous sommes sûrs, et en insistant sur ce que nous demandons, les résultats seront meilleurs pour tout le monde. Nous devons aussi nous souvenir que malgré toutes nos spécifications et raffinements dans les méthodes d'essai, nous avons tous une grande tendance à revenir aux essais ordinaires de la forge quand nous désirons connaître la valeur d'une pièce d'acier de construction et la fatigue qu'elle peut supporter. Dans ces simples essais nous employons une pièce entière toutes les fois que cela est possible; et l'enseignement que nous en tirons est proportionnel à la connaissance que nous avons du sujet, car des faits récents peuvent éclairer sur certains de ces essais, qui montrent la qualité d'une pièce d'acier, ainsi que la façon dont elle a été soumise à l'action de la chaleur, en relation avec les méthodes employées et les résultats obtenus [1].

RAILS D'ACIER

L'usage dans ce pays, en ce qui concerne les rails d'acier, est de prescrire la composition chimique et des essais au choc. Mais dans les cahiers des charges étrangers il n'est pas rare de trouver des essais de pliage, de flexion, des essais au choc, des essais de traction sur éprouvettes découpées dans la tête et des essais de traction sur éprouvettes découpées dans l'âme. Tous ces essais ne sont certainement pas nécessaires, et l'essai à la traction en particulier ne peut pour ainsi dire pas suivre la fabrication des laminoirs parce qu'il faut trop de temps pour préparer les éprouvettes et faire les essais. Ces essais ne peuvent certainement pas être faits sur chaque coulée d'acier, et de petites différences dans la température de finissage donneront lieu à de grandes différences dans la résistance à la traction. D'ailleurs, il n'est pas certain que les résultats de ces essais prouvent la qualité d'un rail d'une manière complète. L'essai au choc est le plus satisfaisant de tous les essais, et peut être fait au moyen d'un petit morceau de rail de chaque coulée d'acier, sans retarder les laminoirs en aucune façon. Le résultat de ces essais au choc, quand on le complète par l'imposition d'une composition chimique convenable, est un moyen convenable et suffisant pour contrôler la qualité de l'acier et du rail lui-même. Comme la bonne qualité des rails a une importance énorme et qu'on en fabrique des quantités considérables, on peut espérer que ce sujet sera discuté comme il le mérite.

On peut certainement admettre que la réduction éprouvée par le lingot pour devenir rail est suffisante dans nos laminoirs modernes, car si l'on employait des lingots beaucoup plus grands, on aurait des ennuis de « ségrégation », et une partie des lingots donnerait des rails cassants, à moins qu'on ne prenne les plus grandes précautions pour déterminer l'importance à donner aux chutes.

Le rail à patin ordinaire est une des sections les plus dures à laminer, parce que la grande masse de métal de la tête retient la chaleur beaucoup plus longtemps que les parties minces de l'âme et du patin. Le patin refroidit trop rapidement et empêche de continuer le laminage de la tête dans les conditions voulues pour finir à une température assez basse et produire les meilleurs résultats. Cette difficulté augmente beaucoup avec les

1 Dans ce qui suit, je cite continuellement mes articles sur « les spécifications types pour l'acier », *Engineering Magazin, March* 1809; et « les rails d'acier, leur composition chimique et leur traitement par la chaleur », *Railroad Gazette*, 16 Fév. 1900.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fortes sections, car les différences entre la température de finissage de la tête et du patin sont encore plus grandes (la tête étant beaucoup plus grosse et ayant une forme compacte, conserve la chaleur bien plus longtemps que le patin mince et large, dont la faculté de conserver la chaleur n'augmente pas dans la même proportion) et les plus gros rails sont généralement finis à trop haute température. Cette difficulté est encore augmentée par l'usage d'un acier plus riche en carbone dans la fabrication des rails les plus lourds, qui demande une température de finissage au laminoir plus basse que les aciers qui contiennent moins de carbone. Au lieu de cela, les rails qui contiennent le plus de carbone sont finis à plus haute température, ce qui, naturellement, donne un beaucoup plus gros grain dans la tête de ces rails que dans les têtes des rails légers. On a proposé bien des choses pour surmonter cette difficulté, mais elle existe toujours. En étudiant bien la question, on verra que pour les rails les plus lourds, il peut être très avantageux de donner un peu plus d'épaisseur au patin et à l'âme, pas pour augmenter la résistance, mais pour conserver la chaleur et pour que la tête puisse être finie à une température beaucoup plus basse, de façon à profiter des bons effets du travail mécanique du laminoir à cette basse température, qui allonge le grain et produit cette belle structure compacte qu'on désire tant. Dans tous les cas, quand la teneur en carbone est plus importante, on doit d'autant mieux éliminer le phosphore ou les rails sont cassants.

Les bons effets du finissage des gros rails à la température convenable de laminage se montrent dans le relaminage de gros rails qui n'ont pas donné en service de bons résultats, mais qui deviennent très bons après ce second laminage. On explique cela d'abord par l'action de recuit éprouvée pendant le chauffage à la basse température nécessaire pour le laminage, qui détruit le gros grain sans que le chauffage soit assez élevé pour qu'il se forme de nouveau. Enfin le finissage de la tête se fait à basse température car le patin est dans un état qui permet de faire ce travail à la température convenable.

On peut citer des cas dans lesquels des rails bons, quant à la composition, ont donné de médiocres résultats, et d'autres dans lesquels des rails de composition médiocre ont donné de bons résultats; et aussi des cas dans lesquels des rails n'ayant qu'une faible teneur en carbone ont mieux résisté à l'usure que d'autres qui étaient faits en acier plus riche en carbone. Ces différences peuvent avoir été et ont probablement été produites par des différences dans l'application de la chaleur à ces rails et les résultats contradictoires sont le meilleur argument pour engager à apporter la plus grande attention à ce qui peut paraître à beaucoup de personnes de petits détails de laminage et de fabrication des rails. Ce problème doit être envisagé dans son ensemble, c'est-à-dire la composition de l'acier, sa fabrication, l'application de la chaleur et la section du rail.

D'une manière générale, les compagnies de chemins de fer n'ont pas assez de renseignements, au moment présent, pour aider les laminoirs à reproduire la commande de rails qui a donné les meilleurs résultats. Elles savent bien en gros comment les rails ont été faits, mais elles n'ont pas d'indications de détail. Je n'ai pas l'intention de vouloir dire par là que l'ingénieur doive intervenir dans les affaires du fabricant ou qu'après avoir donné une commande il doive demander des essais supplémentaires qui n'avaient pas été prévus à l'origine, mais je désire appeler l'attention sur les renseignements précieux qu'on peut obtenir au moyen d'un essai au mouton simple et peu coûteux fait sur de petits morceaux de rails. Ces essais sont un des meilleurs moyens de contrôle que nous connaissions de la température de finissage de l'acier, et cependant, dans beaucoup de cas, on ne les a pas faits, ou on n'a pas eu confiance en eux pour montrer le caractère de l'acier. J'admets que ces essais ne montrent pas tout ce qu'on peut désirer, mais ils sont bien préférables aux essais à la traction pour les rails, et ce sont les meilleurs essais que nous possédions aujourd'hui. Ils devraient être faits sur de petits morceaux de rails (les uns avec la tête en haut, les autres avec la tête en bas) posés sur de solides supports. Si l'acier a la composition voulue comme point de départ, et qu'on apporte les soins voulus à sa fabrication, on produira un rail uniforme si les passes sont bien réglées et si le finissage a lieu à une température assez basse. C'est la température de finissage qui peut le mieux être contrôlée par l'essai au choc; quelques-uns de nos fabricants de rails ont une si bonne opinion de cet essai qu'ils le font sur chaque coulée d'acier pour leur édification propre, tandis que d'autres fabricants ne font pas plus de ces essais qu'ils ne sont forcés d'en faire. Il est certain que les partisans de ces deux systèmes ne peuvent avoir raison les uns et les autres. On a fait valoir que les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

essais au choc ne constituent pas des épreuves assez dures pour les rails lourds. Ceci peut être vrai, et s'il en est ainsi, ces essais peuvent certainement être rendus plus durs pour les rails de qualité supérieure. C'est une question qui n'a pas été assez étudiée jusqu'à ce jour pour que personne puisse avancer des opinions bien formelles sur les essais des rails des plus grosses sections. Les essais au choc permettent de contrôler la fragilité et mettent en garde contre les rails qui casseraient en service. J'ai le regret de dire que nous avons plus d'exemples de rails de 100 livres cassés en service qu'on ne le voudrait et il est de la plus grande importance d'obvier à cette difficulté en faisant usage d'acier d'excellente composition chimique, et de le laminer dans les meilleures conditions possibles pour obtenir une structure à grains fins.

Quant à la surveillance des rails d'acier, elle est trop souvent reléguée par nos ingénieurs de chemins de fer avec la surveillance des traverses et ce sont généralement les hommes qui font le travail au meilleur compte, qu'on recherche; à moins qu'on considère cette surveillance comme si peu importante qu'on ne la fasse pas du tout. Dans ces conditions, il est difficile à ces ingénieurs de dire aux lamineurs s'ils laminent les rails trop lentement ou trop rapidement, ou s'ils ont augmenté à tort la proportion des éléments durcissants, etc. Ce dont les Compagnies de chemins de fer ont besoin, c'est d'avoir sur les rails qui ont été laminés pour elles tous les renseignements qu'elles peuvent se procurer, puis de tenir des états parfaitement en règle de la manière dont ils se comportent en service. Elles auraient ainsi des faits à présenter au moment où elles donneraient de nouvelles commandes.

J'ai cherché à donner de bonnes raisons pour que les conditions d'analyse chimique soient conservées dans les cahiers des charges, à la condition d'être mises à jour à tous les points de vue. Faire autrement reviendrait à admettre que nous ne connaissons rien du problème; que l'expérience du passé ne compte pour rien, et que nous voulons continuer à ramper dans les ténèbres au moment où nous commençons à y voir clair dans quelques-unes des questions qui nous ont causé le plus d'ennuis. Il y a beaucoup d'autres raisons pour conserver les conditions d'analyse chimique. Elles forcent certainement le fabricant d'acier à faire la plus grande attention à ses procédés de fabrication, et l'acier qui en résulte est plus uniforme qu'il ne le serait sans cela. Mais sur ce sujet, comme sur la plupart des sujets, il y a des divergences d'opinion et M. C. P. Sandberg a dit à la réunion de Stockholm de l'*Iron et Steel Institute* :

« Le Congrès des chemins de fer de Paris, en 1889, a demandé un rail d'acier plutôt dur, mais le Congrès de Londres, en 1895, n'a pas voulu le sanctionner. Je suis convaincu qu'au prochain Congrès de Paris, en 1900, les ingénieurs cesseront complètement d'imposer une composition chimique dans leurs cahiers des charges et demanderont seulement un bon essai au choc pour la sécurité, ainsi qu'une flèche minime pour répondre à la dureté demandée, et laisseront complètement de côté les essais à la traction. Ces derniers sont tout à fait déplacés par les rails, qui sont exposés en service à des coups ou des chocs; de plus, les essais à la traction sont lents et coûteux par suite de la préparation des éprouvettes.

« Le rail est exposé à recevoir un coup dans la pratique et par conséquent doit être essayé au choc. L'essai au mouton pourrait être fait sur un rail de chaque coulée, et la flèche maximum à spécifier pour chaque section de rail pourrait être obtenue par expérience en essayant des rails de la dureté voulue de chaque section comme types d'essai de dureté aussi bien que d'essai de sécurité. Ce système d'essais combinés ne coûterait presque rien et ne retarderait pas la réception des rails.

Je suis certain que ce Congrès ne conseillera pas d'abandonner les conditions de composition chimique dans les spécifications relatives aux rails, au moment où nous commençons à en comprendre la valeur. Ce qui est réellement nécessaire est d'être mieux renseigné sur les effets qu'ont les différents éléments entrant dans la composition, sur les rails finis, et je suis fermement convaincu qu'à la fin de nos réunions, les résolutions générales seront en faveur d'un acier de composition chimique donnée pour des rails de différents poids, et ces conditions jointes à un travail convenable et à une bonne température de finissage, donneront les rails les plus solides, les plus durs, et ceux qui donneront à l'usure les meilleurs résultats.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Toutes nos méthodes d'essai de l'acier et nos cahiers des charges ont été créés tout naturellement; ils ont été faits en prenant pour bases des métaux qui avaient donné en service de bons résultats, et en recherchant en quoi ils différaient de ceux qui avaient donné des résultats médiocres ou mauvais. On a accumulé une quantité considérable de renseignements dans cet ordre d'idées et on en a fait usage pour commander les matériaux nouveaux. On a eu confiance pendant des années dans la composition chimique de l'acier, et une teneur importante du phosphore a toujours été considérée comme dangereuse pour toutes les sortes d'acier. Mais par moments, quand l'acier contenant peu de phosphore donnait de mauvais résultats, les autres éléments se trouvant également en quantité peu importante et ne pouvant être rendus responsables, la confiance dans la chimie en tant que guide a été ébranlée. Pour ces raisons et d'autres encore, on a ajouté de temps en temps des essais physiques supplémentaires pour contrôler la qualité de l'acier. Mais petit à petit, on a reconnu l'importance de la façon dont la chaleur est conduite et *aujourd'hui on peut avancer que la conduite de la chaleur pendant le travail de l'acier jointe au travail mécanique a presque autant d'importance que la composition du métal*. En considérant les effets de l'un, il ne faut pas perdre de vue ceux qui sont dus à l'autre, mais il faut penser aux deux, car beaucoup dépend de l'un et de l'autre.

La valeur d'une teneur extrêmement faible en phosphore comme indication de la qualité de l'acier peut être exagérée, c'est quelquefois le cas avec l'acier basique sur sole contenant extrêmement peu de phosphore; vous trouverez souvent qu'il contient extrêmement peu de manganèse. Cet acier dans bien des cas ne donnera pas de bons résultats après forgeage, et quelques fabricants ne voudraient pas le livrer pour être embouti, d'autres, au contraire, le livreraient pour ce travail en attirant l'attention sur la qualité extraordinaire dénotée par l'analyse. L'acier aurait dû contenir plus de manganèse, mais le manganèse a été absorbé par la grande quantité d'oxyde de fer présent et a passé dans la scorie; et il y a de grandes chances pour qu'il reste assez d'oxyde de fer dans l'acier pour le détériorer. Pour ces raisons, très peu de phosphore avec très peu de manganèse peut faire prévoir des ennuis; une limite inférieure de manganèse dans l'acier constituerait donc une garantie additionnelle.

Il est plus que naturel que les fabricants se demandent quelle est l'utilité des cahiers des charges actuels; par exemple, sur l'acier demi-doux pour ponts, car tout le monde accepte le même acier. Il y a là plus qu'il ne semble à première vue, car une fourniture de bon acier remplit les conditions de beaucoup de cahiers des charges différents. Les essais supplémentaires qu'on demande souvent ne donnent pas des avantages correspondants, et quelques-uns de ces essais donnent beaucoup d'ennuis et occasionnent aussi beaucoup de retard. Je ne peux guère critiquer ici trop sévèrement, car j'ai moi-même augmenté le nombre déjà grand des spécifications en ajoutant la mienne à la liste, ma seule excuse est de donner des résultats équivalents au moyen d'essais correspondant à la pratique des laminoirs de ce pays et faciles à faire à la place d'essais plus compliqués auxquels nos usines ne sont pas habituées.

Toute personne qui a été chargée de faire suivre par les laminoirs d'un pays des cahiers des charges provenant d'un autre pays, peut se rendre compte des difficultés que j'ai eues à surmonter, et admettre le grand avantage que des spécifications et des méthodes d'essai internationales présenteraient pour tout le monde. En essayant de réaliser cela, on ne doit pas perdre de vue le côté commercial de la question, car en demandant aux ingénieurs d'abandonner des spécifications préparées pour leurs clients, et qui ont donné des résultats satisfaisants depuis des années, on peut aller trop loin. Mais aucun ingénieur ne s'opposerait à une modification de ses spécifications tendant à les mettre d'accord avec les meilleurs procédés et méthodes de fabrication des autres pays, à moins qu'il ne soit décidé à ne tirer ses matières que d'un seul pays. Les avantages qui en résulteraient pour tout le monde seraient si grands que personne n'hésiterait à y donner tout l'appui possible, à la condition de ne pas apporter de perturbation aux affaires en cours. Il faut tenir compte de cette condition, et il serait bon de l'envisager et de la discuter à cette session. Toutes nos spécifications et toutes nos méthodes d'essai peuvent être remises à jour sous bien des rapports en faisant simplement usage des renseignements que nous avons sous la main. En faisant cela, non seulement l'ingénieur aura de meilleurs matériaux, mais à la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

longue, les constructeurs en bénéficieront aussi parce qu'ils seront forcés de faire tous leurs efforts dans tous les services.

Si l'on étudie les différentes spécifications et les différentes méthodes d'essai en usage dans les différents pays, il semble d'abord impossible d'établir une spécification internationale type. Mais ce n'est pas ce qu'on veut faire. Il faut seulement que les ingénieurs et fabricants de chaque pays se réunissent et rédigent des spécifications représentant une moyenne, basée sur les méthodes en usage, pour chaque classe de métal, par exemple pour les classes suivantes :

Acier pour constructions et ponts de routes
Acier pour navires et ponts de chemins de fer.
Acier pour chaudières.
Acier pour rails.
Acier pour bandages.
Acier pour essieux.
Acier de forge.
Acier moulé.
Fil d'acier.

Le travail final ne sera plus alors aussi formidable qu'il peut paraître au premier abord, car il se trouvera ramené à la comparaison d'un petit nombre de spécifications pour chaque catégorie de métal. Il est évident qu'on ne peut pas espérer arriver à établir une spécification unique pour chaque catégorie d'acier, car dans plusieurs cas il en faudra deux ou trois; mais, même dans ces conditions, il y aura beaucoup de points communs. On voit donc qu'il est parfaitement possible de faire un travail préparatoire utile au cours de cette session, et comme les méthodes d'essai, les spécifications et les procédés de fabrication sont étroitement unis par les relations qu'ils ont les uns avec les autres, il est nécessaire de ne pas les séparer si l'on veut obtenir toutes les améliorations possibles.

Dans les discussions générales de cette nature, bien des points importants peuvent être perdus de vue sans un bon programme qui permette de les conserver sous les yeux. Le tableau suivant a été préparé dans ce but par le professeur H. M. Howe pour la discussion sur les propriétés physiques de l'acier par l' « American Institute of Mining Engineers », Société dont les bulletins contiennent des documents très importants sur ce sujet[1].

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'ACIER

PROGRAMME PROPOSÉ POUR LA DISCUSSION

I. — *Relations entre la composition chimique et les cassures, la structure microscopique et les propriétés physiques.*

II — *Influence de :*

1° La température de la coulée . . . . . (*a*) Cassure.
2° Manière de chauffer et température :
(*a*) Pour le laminage . . . . . (*b*) Microstructure.
(*b*) Pour le recuit. . . . . (*c*) Propriétés physiques.
3° Travail . . . . . (*d*) Résistance à la traction.
4° Température de finissage. . . . . (*e*) Tensions secondaires.
5° Manière dont le refroidissement doit être conduit :
(*a*) Après forgeage.
(*b*) Pour les pièces fondues.

1. Cette société a été la première société technique américaine qui ait étudié les relations existant entre les propriétés chimiques et physiques, la conduite de la chaleur pendant le travail et le travail mécanique. La liste suivante des communications et discussions contenues dans ses « Transactions » forment l'historique des progrès faits dernièrement dans cette direction et contiennent des renseignements indispensables aux recherches scientifiques et pratiques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. — *Ségrégation produite par :*

1° La composition.
2° La température de coulée.
3° La conduite du refroidissement.

IV. — *Soufflures et retirures, influence sur leur volume et leur position des causes suivantes :*

1° Composition.
2° Température de coulée.
3° Pression de coulée.
4° Conduite du refroidissement.
5° Additions spéciales.
6° Forgeage.

V. — *Durcissage; relation entre la résistance à la traction et la dureté de l'acier trempé, etc.*

1° La température de trempe.
2° Le milieu de trempe.
3° Les dimensions de la pièce trempée.

NOM	TITRE DE LA NOTE	ANNÉE ET VOLUME
Jno B. Pearse	Fabrication des rails de fer et d'acier.	1872-1873, I.
A. L. Holley.	Avantages du laminage sur le forgeage des lingots	d°
A. L. Holley.	Essais de l'acier	1873-1874, II.
A. Macmartin	Changements mécaniques dans l'acier Bessemer.	d°
Prof. T. Egleston. . .	Recherches sur le fer et l'acier.	1873-1874, III.
Dr. R. W. Raymond.	Le phosphore et le carbone dans le fer et l'acier.	d°
Dr. R. W. Raymond.	Recuit du Spiegeleisen.	d°
A. L. Holley	Quelques-uns des pressants besoins de nos fabricants de fer et d'acier	1875-1876, IV.
A. L. Holley	Qu'est-ce que l'acier ?	d°
Fred'k. Prime, Jr. . .	Ce qu'est l'acier	d°
Dr. Auguste Wendel. .	L'effet du manganèse sur le métal Bessemer	d°
Wm. Metcalf.	Nomenclature scientifique et commerciale du fer.	1876-1877, V.
G. H. Billings	Les propriétés du fer allié avec d'autres métaux.	d°
H. M. Howe	Nomenclature du fer	d°
W. E. Coxe	Endurance des rails de fer.	d°
A. L. Holley.	La résistance du fer forgé au point de vue des modifications dues à la composition et à la réduction subie au laminage..	1877-1878, VI.
Dr. Chas. B. Dudley. .	La composition chimique et les propriétés physiques des rails d'acier	1877-1878, VII.
Dr. Chas. B. Dudley. .	La résistance à l'usure des rails d'acier augmente-t-elle avec la dureté de l'acier ?	1878-1879, VII.
Wm. Kent.	Sur un appareil pour essayer la résistance des métaux au moyen de chocs répétés.	1879-1880, VIII.
Prof. T. Egleston. . .	La loi de la fatigue et du rafraichissement des métaux. . . .	d°
Dr. Chas. B. Dudley. .	La résistance à l'usure des rails d'acier en fonction de leurs compositions chimiques et de leurs propriétés physiques. .	1880-1881, IX.
S. A. Ford.	La quantité de manganèse nécessaire pour faire disparaître l'oxygène du fer après le soufflage dans le convertisseur Bessemer	d°
Jno. W. Cabot. . . .	Note sur le manganèse dans l'acier à rail Bessemer.	1881-1882, X.
Discussion générale. .	Note sur le fer et l'acier comme matériaux de construction. .	d°
Alex. Pourcel	Note sur les relations du manganèse et du carbone dans le fer et l'acier.	1882-1883, XI.
Albert F. Hill. . . .	Le traitement de l'acier de construction	d°
J. C. Bayles	Analyse microscopique de la structure de l'acier et du fer. .	d°
Alfred F. Hunt. . . .	Coulée d'acier sur sole, pour les tôles de chaudières	1883-1884, XII.
Pedro G. Salom. . . .	Essais physiques et chimiques pour l'acier pour chaudières ou construction de navires destinés aux croiseurs du gouvernement des État-Unis	d°
J. C. Bayles	L'étude du fer et de l'acier.	1883-1884, XIII.
Prof. B. W. Cheever .	La ségrégation des impuretés pendant le refroidissement des lingots d'acier Bessemer.	d°
R. Gatewood.	Théorie pour expliquer la formation des centres durs dans les lingots d'acier	d°
F. L. Garrison. . . .	La structure microscopique du fer et de l'acier.	1885-1886, XIV.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

NOM	TITRE DE LA NOTE	ANNÉE ET VOLUME
Jno. W. Cabot	L'influence de la température dans la fabrication de l'acier sur la manière dont les lingots se comportent au laminage.	1885-1886, XIV.
Pedro G. Salom . . .	La fabrication de l'acier moulé.	d°
H. H. Campbell. . . .	L'homogénéité de l'acier sur sole	d°
P. Ostberg.	Moulages-mitis de fer et acier.	d°
A. E. Hunt	Acier doux pour les tôles de chaudières	d°
J. L. Garrison. . . .	Structure microscopique des rails d'acier.	1886-1887, XV.
B. W. Chewer	Deux états du phosphore dans la fonte.	d°
F. A. Delano.	Certaines conditions de la fabrication des rails d'acier qui peuvent influencer leur durée	1887-1888, XVI.
F. A. Delano	Sections de rails.	1888-1889, XVII.
Dr. C. B. Dudley. . .	L'usure du métal, influence des propriétés physiques et chimiques	1888-1889, XIX.
J. W. Langlay	L'aluminium dans les lingots d'acier	1891-1892, XX.
A. E. Hunt	Les Essais et les conditions à remplir par le fer et l'acier de construction	d°
Dr. C. B. Dudley. . .	Établissement des cahiers des charges pour les matériaux de construction.	1892-1893, XXI.
H. M. Howe	Note sur l'acier au manganèse.	d°
Wm. R. Webster. . .	Observations sur les relations entre la composition chimique et les caractères physiques de l'acier	d°
A. Pourcel.	La ségrégation et ses conséquences dans les lingots de fer et d'acier	1893, XXII.
F. Osmond	Métallographie microscopique	d°
A. Souver	Microstructure de l'acier.	d°
H. H. Campbell. . . .	Le procédé sur sole.	d°
Wm. R. Webster. . .	Remarques complémentaires sur les relations entre la composition chimique et les caractères physiques de l'acier . . .	1893, XXIII.
H. M. Howe	Conduite de la chaleur pendant le travail de l'acier.	d°
A. Martens	Microstructure du fer fondu en lingots de fusion	d°
R. A. Hadfield	Alliages de fer à propos de l'acier au manganèse.	d°
Discussion générale. .	Sur les caractères physiques de l'acier.	1893, XXIII, XXIV.
H. M. Howe	La pyrométrie et la conduite de la chaleur pendant le travail de l'acier	1894, XXIV.
F. L. Sperry.	Nickel et acier au nickel.	1895, XXV.
Wm. R. Webster. . .	Note sur un plan d'études des propriétés physiques de la fonte.	d°
Dr. R. W. Raymond. .	Note sur le cuivre dans le fer et l'acier.	1896, XXVI.
A. Souver	Microstructure de l'acier et théories courantes sur la trempe.	d°
Wm. R. Webster. . .	Les relations entre la composition chimique et les caractères physiques de l'acier.	1896, XXVIII.
Discussion générale. .	Sur les propriétés physiques de la fonte	XXV, XXVI, XXVII, XXVIII.

WILLIAM R. WEBSTER.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

IX

EXAMEN

DES

SPÉCIFICATIONS NORMALES AMÉRICAINES PROPOSÉES

ÉPROUVETTES ET MÉTHODES D'ESSAI DU FER ET DE L'ACIER

AVEC

UNE DISCUSSION DES MÉTHODES COMMERCIALES D'ESSAIS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU FER ET DE L'ACIER AUJOURD'HUI EN USAGE AUX ÉTATS-UNIS ET UN EXAMEN CRITIQUE DE SPÉCIFICATIONS ÉTRANGÈRES POUR RAILS D'ACIER

COMMUNICATION

Présentée par M. Albert Ladd COLBY

REPRÉSENTANT DE L' " ASSOCIATION OF AMERICAN STEEL MANUFACTURERS ", DÉLÉGUÉ OFFICIEL DES ÉTATS-UNIS AU CONGRÈS INTERNATIONAL DES MÉTHODES D'ESSAI DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION, PARIS 1900; MEMBRE DU JURY DES ÉTATS-UNIS DE LA CLASSE DE MÉTALLURGIE, EXPOSITION DE PARIS DE 1900; DÉLÉGUÉ DE L' " AMERICAN CHEMICAL SOCIETY " AU QUATRIÈME CONGRÈS DE L'ASSOCIATION DE CHIMIE APPLIQUÉE, PARIS, 1900; INGÉNIEUR EN MÉTALLURGIE DES ACIÉRIES DE BETHLEHEM, SOUTH BETHLEHEM, PA.

MEMBRE DE L' " IRON AND STEEL INSTITUTE, AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, AMERICAN SOCIETY OF MINING ENGINEERS, AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, SOCIETY OF CHEMICAL INDUSTRY, INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS ", ETC.

INTRODUCTION

Les spécifications qui règlent les propriétés chimiques et physiques du fer et de l'acier destinés à des buts spéciaux peuvent très bien être matière à des conventions internationales. Il y a de certaines exigences générales qui doivent être comprises dans ces spécifications internationales, et, au contraire, il y a une classe d'exigences qui ne doivent pas s'y trouver.

Les spécifications internationales doivent indiquer le procédé ou les procédés de fabrication d'après lesquels l'acier destiné à un but donné devra être fabriqué; cependant elles ne doivent pas prescrire les détails du procédé, puisque les méthodes de fabrication, tout en produisant un produit satisfaisant, varient dans les différents pays. Elles doivent embrasser des limites en ce qui regarde certaines parties constituantes chimiques de l'acier, spécialement le phosphore et le soufre de l'acier acide aussi bien que basique; et elles doivent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

prescrire des limites par rapport à toutes les propriétés physiques qui aident matériellement à montrer si l'acier est approprié au but voulu.

Les spécifications internationales doivent aussi décrire la forme, le nombre, et la provenance des éprouvettes, et indiquer les méthodes générales de déterminer les propriétés physiques spécifiées; elles doivent en outre mentionner comment il faut que l'échantillon pour l'analyse chimique soit pris. Elles doivent contenir des clauses qui règlent le finissage et la marque exigés du produit, et enfin une clause qui accorde à l'inspecteur les facilités nécessaires pour qu'il s'acquitte des stipulations des spécifications.

Le texte des dix spécifications, formulées d'après les idées ci-dessus, se trouve comme appendice à la fin de ce mémoire. Ces spécifications furent rédigées par un Comité composé de trente-quatre membres, choisis de manière à ce que tous les intérêts soient également représentés.

Une partie des travaux du Comité a été l'arrangement, par tableaux, des spécifications américaines déjà existantes et chaque sous-comité a compris les meilleures caractéristiques de ces spécifications dans l'organisation des spécifications normales américaines proposées. Les rapports des sous-comités ont été discutés dans des réunions fréquentes depuis le 9 mars 1899, et le vote final sur chaque spécification a été pris le 1er mai 1900 par correspondance. A une très grande majorité, ces spécifications ont été déclarées représenter la meilleure pratique américaine.

Le Comité est désireux que son travail reçoive la critique de tous les intérêts représentés. Leurs spécifications normales proposées, avec tableaux, démontrant les lignes principales des spécifications existantes, ont été imprimées sous forme de dix bulletins.

Quelques-unes de ces dix propositions ont été discutées à la réunion mensuelle de la Société américaine des Ingénieurs Civils, du 16 mai. Elles ont été également le sujet de discussion à la réunion de commencement d'année de la Société américaine des Ingénieurs Mécaniques, au mois de mai, à Cincinnati. A ces deux réunions les bulletins en question ont été largement distribués. Ils seront discutés également aux réunions d'été de l'Association américaine des maîtres-mécaniciens de Chemins de fer, à l'Institut américain des Ingénieurs des Mines et autres associations techniques. En même temps ils ont été examinés et critiqués par les premiers journaux techniques en Amérique. La liste de ces dix spécifications est comme suit.:

I. **Pièces d'acier fondues.**
II. **Essieux en acier.**
III. **Pièces d'acier forgées.**
IV. **Bandages d'acier.**
V. **Rails d'acier.**
VI. **Plaques de jonction en acier.**
VII. **Acier pour construction d'édifices.**
VIII. **Acier pour construction de ponts et navires.**
IX. **Acier Martin-Siemens à plaques de chaudière et à rivets.**
X. **Fer forgé.**

Les demandes contenues dans les neuf spécifications pour acier sont décrites et discutées dans le mémoire suivant, sous les titres uniformes qui se trouvent dans chaque spécification, plan qui facilitera matériellement l'étude comparative des stipulations. La spécification pour fer forgé est l'objet d'une discussion séparée.

Ces dix spécifications sont présentées à ce Congrès international des méthodes d'essai de matériaux de construction, avec la recommandation que, puisqu'elles sont à présent très généralement discutées en Amérique, en vue de leur adoption comme spécifications réglementaires nationales, elles soient aussi étudiées et discutées par ce Congrès, en vue de leur adoption future comme base de spécifications réglementaires internationales.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'étude approfondie que ces spécifications recevront, sans aucun doute, de ce Congrès international, rendra d'immenses services aux ingénieurs et industriels américains quand ils se réuniront vers la fin de cette année en Amérique, pour la discussion qui précédera l'adoption desdites spécifications comme spécifications réglementaires nationales.

---

1. — Procédés de fabrication spécifiés

1. Acier au creuset. — Les spécifications comprennent l'emploi de l'acier au creuset pour les pièces forgées, les pièces fondues et les essieux. Cependant, dans la pratique courante en Amérique, il n'y a qu'une très petite proportion de ces produits qui sont faits avec ce genre d'acier. Par exemple, la production de pièces fondues d'acier de creuset, ne s'éleva en 1899 qu'à 3556 tonnes métriques, et à présent il n'y a pas même 2 % des bandages américains qui soient faits avec l'acier de creuset.

2. Acier Bessemer. — Un examen des neuf spécifications pour acier qui se trouvent dans l'appendice, révèle que l'acier Bessemer peut être employé dans la fabrication de rails, de plaques de jonction et d'acier pour la construction des édifices, y compris les rivets. Il est spécifié aussi qu'il est permis de se servir de l'acier Bessemer pour la fabrication de pièces fondues, d'essieux et de pièces forgées.

Dans la pratique actuelle en Amérique, l'acier Bessemer, destiné aux buts cités plus haut, est fabriqué par le procédé acide[1].

En effet, tous les rails d'acier qui sont laminés aux États-Unis sont faits avec de l'acier Bessemer. La production totale de tous les genres de rails de l'année 1899 aux États-Unis s'éleva à 2 309 166 tonnes métriques. Il n'y en eut que 532 tonnes métriques de rails d'acier Martin-Siemens, qui furent fabriqués en Pennsylvanie et en Alabama; et il y eut 1618 tonnes métriques de rails de fer. L'acier Bessemer ne s'emploie que dans une petite proportion des pièces fondues, des essieux et des pièces forgées qui se fabriquent aux États-Unis. La production des pièces fondues en acier Bessemer ne fut en 1899 que de 4002 tonnes métriques, inclus la production d'une usine Roberts-Bessemer et quatre usines Tropenas-Bessemer.

Il n'existe aucune statistique montrant dans quelle proportion l'acier Bessemer entre dans les plaques de jonction et dans l'acier pour construction d'édifices, fabriqués aux États-Unis.

3. Acier Martin-Siemens. — Toutes les neuf spécifications pour acier permettent l'emploi de l'acier Martin-Siemens, qui est la seule espèce d'acier spécifiée pour l'acier de plaques de chaudière et rivets, l'acier de construction de ponts et navires, et l'acier pour essieux.

On ne fait aucune distinction entre le procédé de l'acier Martin-Siemens acide et basique; si ce n'est que dans l'acier pour ponts et navires, une proportion de phosphore plus élevée est permise dans le cas de fourniture d'acier acide (8 centièmes de 1 % au lieu de 6 centièmes de 1 %).

Les statistiques officielles suivantes montrent la récente augmentation dans l'adoption de l'acier Martin-Siemens basique aux États-Unis :

1. Il y a trois usines Bessemer basiques aux États-Unis, dont une à Troy, N. Y., une à Pottstown, Pa., et une à Indianapolis, Indiana. Aucune de ces usines ne fonctionne à l'heure actuelle.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE I. — *Production de l'acier Martin-Siemens aux États-Unis*

Tonnes métriques.

Année	Basique	Acide	Total	Basique pour cent
1896	788,721	550,833	1,319,554	59.8
1897	1,073,000	561,502	1,634,502	65.6
1898	1,594,613	671,492	2,266,105	70.4
1899	2,113,832	880,810	2,994,642	70.6

Les procédés de fabrication demandés dans les neuf spécifications pour acier sont clairement indiqués dans le tableau suivant :

Spécifications pour	Martin-Siemens	Procédé à creuset	Procédé Bessemer
Pièces d'acier fondues	Martin-Siemens.	Creuset.	Bessemer.
Essieux d'acier	Martin-Siemens.	»	»
Pièces d'acier forgées	Martin-Siemens.	Creuset.	Bessemer.
Bandages d'acier	Martin-Siemens.	Creuset.	»
Rails d'acier	Martin-Siemens.	»	Bessemer.
Plaques de jonction en acier	Martin-Siemens.	»	Bessemer.
Acier pour construction d'édifices	Martin-Siemens.	»	Bessemer.
Acier pour construction de ponts et navires	Martin-Siemens.	»	»
Acier à plaques de chaudières et à rivets	Martin-Siemens.	»	»

4. Les détails des procédés de fabrication ne devraient pas être spécifiés. — A une seule exception, les spécifications pour acier, mentionnées dans l'appendice, omettent avec grande raison toutes restrictions en ce qui concerne les *détails* des procédés de fabrication, parce que ces spécifications, présentées comme des spécifications et des procédés internationaux, sont forcément différentes dans les différents pays, et aussi parce qu'il est, en général, en dehors du domaine de l'ingénieur de spécifier les détails des procédés métallurgiques; lorsque le fabricant lui donne toutes les facilités désirables, peu lui importe que la matière fabriquée soit conforme ou non à la spécification. La clause suivante concernant la spécification pour rails d'acier constitue l'exception sus-mentionnée :

« Tout le procédé de fabrication et d'essayage doit être conforme à la meilleure pratique actuelle. On doit avoir bien soin d'observer les indications suivantes. Les lingots doivent être tenus en position verticale dans les fours à réchauffer; on ne doit pas employer de lingots saignés (creux); on doit enlever assez de matière à la tête du lingot pour s'assurer que les rails seront sains. »

Autant qu'il s'agit de la pratique américaine, cette clause est inutile, parce que les détails des procédés spécifiés sont observés dans la pratique journalière des fabriques de rails aux États-Unis.

Si un ingénieur préfère l'acier Martin-Siemens acide au basique, il lui est tout à fait loisible de le spécifier. Naturellement, il restreint la concurrence et augmente le prix de sa construction. S'il désire que le métal fini soit recuit, c'est aussi son affaire de déterminer le procédé de recuisson, et d'exiger qu'il ne comprenne un lent refroidissement dans la température initiale de fonte, de laminage ou de forgeage. Cependant il est manifestement en dehors du domaine sur lequel il a la haute main que de demander par exemple :

« Que tout l'acier pour fil soit fait dans un fourneau Martin-Siemens garni avec de la silice; que cet acier soit fait entièrement avec du fer cru sans mélange de ferraille d'aucune espèce ni d'aucune forme et sans employer une autre provenance; que pendant la réduction de l'acier dans le fourneau Martin-Siemens, l'acier ne soit pas décarbonisé par en dessous

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de 10 centièmes de 1 % (0,10 %); que l'acier fini soit mis en lingots coulés par le fond, d'une grandeur ne dépassant pas 40 centimètres carrés, 64 dans la plus grande section transversale, d'un poids n'excédant pas 2267 kilogrammes, 96 chacun, et coulés par groupes de pas moins de six lingots par chaque groupe;

« Que l'acier ne soit ni fait ni coulé sans que l'ingénieur ou son représentant soit présent; que tous chefs, contremaîtres, fondeurs, aides et autres, employés dans la fabrication de l'acier à cette construction, soient des hommes expérimentés dans ce genre de travail et possédant une pratique suffisamment sûre pour assurer les meilleurs résultats. »

L'opinion unanime parmi les fabricants d'acier, qui sont certainement en situation d'être les meilleures juges, est que dans la pratique les exigences, comme celles ci-dessus mentionnées, ne réussissent pas à obtenir un métal meilleur que celui fourni d'après les spécifications dans lesquelles ces exigences ne se rencontrent pas. Il n'y a donc point de raisons sérieuses pour qu'elles existent. Une inspection consciencieuse, venant après les spécifications qui règlent les détails de presque chaque progrès du travail dans l'usine, est complètement impossible, étant données les limites de la dépense d'inspection accordées par l'ingénieur ou le contractant. Même si un ou deux ingénieurs, envoyés aux aciéries pour surveiller la fabrication, étaient tout à fait familiers avec les procédés de fabrication, ce qui est rarement le cas, il leur serait impossible d'assister à tous les progrès variés de l'avancement de la fabrication et de les juger intelligemment, de même qu'il leur serait impossible d'inspecter et de surveiller les essais du métal fini, sans apporter des retards matériels dans les opérations de la fabrication. Les exigences d'une spécification réglant les détails des procédés de fabrication sont aussi souvent franchement ignorées par l'un et par l'autre, le fabricant et l'inspecteur, et dans certains cas sont supprimées ou matériellement modifiées par l'ingénieur pour permettre à son contractant de commander le métal.

5. Recuisson. — Il a été en grande partie omis, dans les spécifications pour acier en question, de faire allusion à cet important procédé de la recuisson pour le déplacement de la tension interne inévitablement existante dans un métal à l'état fini, comme les pièces d'acier fondues, les pièces d'acier forgées, barres à œillet et plaques, pour laisser l'acheteur libre d'en faire mention dans les commandes, s'il désire un métal meilleur et s'il veut payer la dépense additionnelle; ou le laisser libre de spécifier formellement que son métal ne sera pas recuit, dans le cas où il craindrait, comme cela a été prétendu à tort par quelques ingénieurs, que le procédé de recuisson est employé par les fabricants pour ramener un métal inférieur aux exigences physiques spécifiées. Comme il a été ci-dessus indiqué, c'est à l'ingénieur seul à spécifier que le lent refroidissement dans la température initiale de la fonte, du laminage ou du forgeage, ne doit pas être considéré comme recuisson, car un tel moyen, remplaçant à bon marché une véritable recuisson, grossit le grain et par conséquent affaiblit l'acier. Bien au contraire, il vaut mieux qu'il augmente les pourcentages d'allongement et de striction requis, plutôt que de chercher à spécifier la température à laquelle l'acier doit être chauffé à nouveau, ou d'autres détails concernant les procédés de recuisson.

II. — Propriétés chimiques spécifiées

6. Demandes chimiques. — La table II donne la composition chimique à laquelle l'acier doit se conformer quand il est employé aux neuf différents buts spécifiés dans l'appendice. Là où la résistance de traction est spécifiée, les limites en carbone sont omises à dessein, excepté dans le cas des plaques de jonction, où l'on indique une limite en carbone par la raison que les propriétés physiques spécifiées sont actuellement rarement demandées. Les limites en manganèse sont mentionnées dans le cas des bandages, acier à plaques de chaudière et à rivets, plaques de jonction et rails, et en silicium seulement dans le cas des bandages et des rails. Le phosphore est très à propos spécifié dans toutes les différentes classes comprises dans les neuf spécifications pour acier, et le soufre dans toutes les classes excepté l'acier de rails et l'acier pour construction d'édifices. Aucune limite en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE II. — Limites demandées dans la composition chimique des aciers.

CAHIER DES CHARGES.	CARBONE. Ne dépassera pas :	MANGANÈSE. Ne dépassera pas :	SILICIUM. Ne sera pas au-dessous de :	PHOSPHORE. Ne dépassera pas :	SOUFRE. Ne dépassera pas :	NICKEL. Ne dépassera pas :
	Pour cent.	Pour cent.	Pour cent.	Pour cent.	Pour cent.	Pour cent.
Pièces d'acier fondues . Pièces fondues ordinaires	0,40	. . . . .	. . . . .	0,08	. . . . .	. . . . .
Pièces fondues à soumettre aux épreuves	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,05	0,05	. . . . .
Essieux en acier . . . . Essieux pour voitures, machines, trucks et tenders	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,06	0,06	. . . . .
Essieux pour roues motrices (acier au carbone)	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,06	0,06	. . . . .
Essieux pour roues motrices (acier au nickel)	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,04	0,04	3,75
Pièces d'acier forgées. . . Pièces forgées d'acier doux ou à petite teneur en carbone	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,10	0,10	. . . . .
Pièces forgées d'acier au carbone non recuit	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,06	0,06	. . . . .
Pièces forgées d'acier au carbone trempé à l'huile ou recuit	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,04	0,04	. . . . .
Pièces forgées d'acier au nickel trempé à l'huile ou recuit	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,04	0,04	3,75
Bandages d'acier	. . . . .	0,80	0,20	0,05	0,05	. . . . .
Acier pour construction d'édifices, y compris les rivets	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,10	. . . . .	. . . . .
Acier pour construction de ponts et navires. . Acier fabriqué par le procédé acide	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,08	0,06	. . . . .
Acier fabriqué par le procédé basique	. . . . .	. . . . .	. . . . .	0,06	0,06	. . . . .
Acier Martin Siemens pour plaques à chaudières et pour rivets. . . Acier pour collets ou chaudières	. . . . .	0,30-0,60	. . . . .	0,06	0,05	. . . . .
Acier pour foyers de chaudière	. . . . .	0,30-0,50	. . . . .	0,04	0,04	. . . . .
Acier très doux	. . . . .	0,30-0,50	. . . . .	0,04	0,04	. . . . .
Acier pour plaques de jonction	0,15	0,30-0,60	. . . . .	0,10	. . . . .	. . . . .
Rails des poids spécifiés en kilos par mètre . . . . . 24,802 à 29,266 +	0,35-0,45	0,70-1,00	0,20	0,10	. . . . .	. . . . .
29,763 à 34,288 +	0,38-0,48	0,70-1,00	0,20	0,10	. . . . .	. . . . .
34,723 à 39,188 +	0,40-0,50	0,75-1,05	0,20	0,10	. . . . .	. . . . .
39,683 à 44,148 +	0,43-0,53	0,80-1,10	0,20	0,10	. . . . .	. . . . .
44.645 à 49,605 +	0,45-0,55	0,80-1,10	0,20	0,10	. . . . .	. . . . .

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE III. — Limites demandées dans les propriétés physiques des aciers.

SPÉCIFICATIONS DU CAHIER DES CHARGES.	RÉSISTANCE DE TRACTION KILOS PAR M/M².	LIMITE ÉLASTIQUE APPARENTE KILOS PAR M/M².	ALLONGEMENT. Voyez la note (*e*).	STRICTION.	ESSAI DE FLEXION D = diamètre. T = épaisseur.
			Pour cent.	Pour cent.	
Pièces d'acier fondues. — Pièces fondues ordinaires.	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
Pièces d'acier fondues. — Pièces à soumettre aux essais . . . — Dur	59,76	26,89	15	20	. . . . .
Pièces d'acier fondues. — Pièces à soumettre aux essais . . . — Moyen	49,22	22,15	18	25	90° D = 2 T
Pièces d'acier fondues. — Pièces à soumettre aux essais . . . — Doux.	42,19	18,98	22	30	120° D = 2 T
Essieux en acier. — Voiture, machine, truck, et truck de tender. .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
Essieux en acier. — Essieux pour roue motrice (acier au carbone). .	56,25	28,12	18	. . . . .	. . . . .
Essieux en acier. — Essieux pour roue motrice (acier au nickel). . .	56,25	34,15	25	45	. . . . .
Pièces d'acier forgées. — Acier doux ou à petite teneur en carbone.	40,78	20,39	28	35	180° D = T
Pièces d'acier forgées. — Acier au carbone, non recuit..	52,73	26,37	18	30	180° D = 3 T
Pièces d'acier forgées. — Acier au carbone, recuit..	Voir le cahier des charges. Les qualités physiques varient suivant le diamètre des pièces forgées. — Voyez la note (*c*).				
Pièces d'acier forgées. — Acier au carbone, trempé à l'huile. . . .					
Pièces d'acier forgées. — Acier au nickel, recuit..					
Pièces d'acier forgées. — Acier au nickel, trempé à l'huile.					
Bandages d'acier. . . — Machines à voyageurs.	70,31	. . . . .	12	. . . . .	. . . . .
Bandages d'acier. . . — Machines à marchandises.	77,34	. . . . .	10	. . . . .	. . . . .
Bandages d'acier. . . — Machines de manœuvre.	84,37	. . . . .	8	. . . . .	. . . . .
Acier pour construction d'édifices. — Acier à rivets..	35,15-42,19	21,09	26	. . . . .	80° à plat
Acier pour construction d'édifices. — Acier moyen.	42,19-49,22	24,61	22 Voyez la note (*b*).	. . . . .	180° D = T
Acier pour construction de ponts et navires. . . . . — Acier à rivets.	35,15-42,19	21,09	26	. . . . .	180° à plat
Acier pour construction de ponts et navires. . . . . — Acier doux..	36,56-43,59	22,50	25	. . . . .	180° à plat
Acier pour construction de ponts et navires. . . . . — Acier moyen.	42,19-49,22	24,61	22 Voyez la note (*b*).	. . . . .	180° D = T
Acier Martin Siemens pour plaques à chaudière et pour rivets. — Acier pour collets ou chaudières.	38,67-45,70	23,20	25	. . . . .	180° à plat
Acier Martin Siemens pour plaques à chaudière et pour rivets. — Acier pour foyers de chaudières	36,56-43,59	22,50	26	. . . . .	180° à plat
Acier Martin Siemens pour plaques à chaudière et pour rivets. — Acier très doux.	37,64-38,67	21,09	28 Voyez la note (*b*).	. . . . .	180° à plat Voyez la note (*d*).
Rails d'acier (voyez la note *a*).	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
Acier pour plaques de jonction.	37,97-45,00	22,50	25	. . . . .	180° à plat

NOTES.

(*a*) Cette table ne comprend ni l'essai au choc, demandé pour pièces fondues, essieux, bandages et rails; ni l'essai d'homogénéité pour tôles d'acier à foyers de chaudière; ni l'essai de percussion pour les grandes pièces fondues.

(*b*) Il faut se rapporter au texte des spécifications pour voir les variations de l'allongement tolérés dans les aciers minces et épais pour construction et dans l'acier pour chaudières; et pour se rendre compte des essais de traction des barres à œillet, qui gardent toute leur grandeur.

(*c*) Pour les quatre classes de pièces d'acier forgées pour lesquelles il n'y a pas d'indication de chiffres dans la table, on trouvera, en se rapportant au cahier des charges, que la limite d'élasticité proportionnelle est spécifiée au lieu de la limite élastique apparente.

(*d*) Ces mêmes essais de flexion sont demandés après trempe. (Voyez le cahier des charges pour les détails.)

(*e*) Les allongements indiqués pour les pièces fondues, les essieux, les pièces forgées et les bandages sont mesurés sur une longueur utile de 50^{mm},8; les autres sur une longueur utile de 203^{mm},2.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cuivre n'a été spécifiée, étant surabondamment prouvé[1] qu'il n'exerce aucune influence delétère même lorsqu'il se présente dans de plus grandes proportions que celles qu'on trouve dans l'acier fabriqué dans certaines localités des États-Unis, obligées de se servir en partie de minerais contenant de petites quantités de ce métal.

7. Carbone non spécifié. — L'omission du carbone quand la résistance de traction est spécifiée est conforme aux plus récentes et aux meilleures opinions sur ce sujet. On peut facilement citer des exemples d'après des spécifications existantes, où la force de résistance de traction n'a pas pu être réalisée lorsque les limites requises en carbone, et en quelques cas en manganèse et silicium, étaient des conditions inhérentes au choix de l'acier. Là où les propriétés physiques désirées sont clairement et convenablement spécifiées, la composition chimique de l'acier, outre celle qui prescrit les limites des impuretés préjudiciables, phosphore et soufre, peut être, dans l'état actuel de la fabrication de l'acier, laissée en toute sûreté aux soins du fabricant.

Pour la discussion des méthodes d'échantillonnage et des méthodes d'analyses chimiques, voir paragraphes 29 et 65.

III. — Propriétés physiques spécifiées

8. Résistance de traction. — Dans toutes les spécifications, excepté pour les rails d'acier, les limites de la résistance de traction sont spécifiées. Pour les aciers de construction, l'acier de plaques de chaudière et de rivets, et les plaques de jonction il est spécifié une limite de résistance de traction de $7^{kg},03$ par millimètre carré, comme il est indiqué dans la table III. Dans toutes les autres spécifications les demandes minima sont indiquées. Les essais de résistance à la traction, exigés pour les barres à œillet de grandeur naturelle, sont mentionnés dans la spécification pour l'acier pour la construction des ponts et des navires.

On spécifie la résistance de traction pour s'assurer de la force nécessaire dans le métal. La limite d'élasticité proportionnelle est cependant la vraie preuve de la capacité du métal de supporter la force. Pour le métal qu'on chauffe toujours avant de le laminer, grand nombre d'essais ont prouvé qu'en effet la limite d'élasticité proportionnelle ne baisse jamais au-dessous de 50 % de la résistance de traction. Comme la détermination exacte de cette limite est impossible dans les essais rapides usités dans le commerce, on se fie à l'essai de résistance de traction pour indiquer la limite d'élasticité proportionnelle. Muni de cette information, on peut calculer avec sûreté la force que le métal pourra certainement supporter.

La limite élastique apparente, comme elle est déterminée dans les essais ordinaires, fournit une assurance désirable de l'exactitude de la supposition que la limite d'élasticité proportionnelle du métal dont il s'agit est au moins égale à la moitié de sa résistance de traction.

9. Limite élastique apparente et limite d'élasticité proportionnelle. — On voit dans la table III que la limite élastique apparente est exigée dans tous les cas où la résistance de traction est spécifiée, excepté pour les bandages d'acier. En se reportant à la spécification pour les pièces d'acier forgées, on trouvera que pour les pièces forgées en acier au nickel, trempées à l'huile et pour les pièces forgées d'acier au carbone trempées à l'huile, la limite d'élasticité proportionnelle est demandée au lieu de la limite élastique apparente.

10. Allongement. — Le pourcentage d'allongement requis est mesuré sur une longueur de $203^{mm},2$ pour les aciers de construction, de plaques à chaudière et de rivets, aussi bien que pour les plaques de jonction; et sur une longueur de $50^{mm},8$ pour pièces fondues, essieux, pièces forgées et bandages. Les différents pourcentages d'allongement qui sont exigés sont indiqués dans la table III. Dans les spécifications pour l'acier pour construc-

1. *Manufacture and Properties of Structural Steel*, par H.-H. Campbell. New-York, 1896, pp. 274-275.
Copper in Steel, par Albert Ladd Colby : The Iron Age, vol. 64, 30 novembre 1899, pp. 1-7.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion d'édifices, de ponts et de navires, et pour l'acier à plaques de chaudière et à rivets, certaines modifications sont citées pour le métal mince et épais et pour les boulons.

L'allongement dans la plupart des aciers de commerce est une preuve sûre de leur ductilité. Dans l'état actuel de la fabrication d'acier, l'allongement est un moyen préventif, là où la résistance minimum de traction est demandée, contre l'emploi, pour le but proposé, d'un acier à trop grande teneur en carbone ou en d'autres éléments endurcissants. La facilité avec laquelle on peut déterminer l'allongement du métal laminé, lui donne sa valeur et le rend désirable, en ce qui concerne l'essayage ordinaire des grandes productions, là où la rapidité aussi bien que la précision des essais sont demandés.

11. Striction. — Le pourcentage de striction est compris dans les spécifications pour pièces forgées, essieux et pièces fondues, où on détermine la résistance de traction avec une éprouvette tournée. On l'a omis dans la spécification pour les bandages, où une éprouvette tournée est employée aussi, parce qu'on l'a considérée inutile dans l'essai de l'acier à grande teneur en carbone employé dans ce cas, puisque les bandages sont recuits très rarement.

La valeur de cette détermination, comme preuve de la qualité de l'acier, est parfaitement appréciée de ceux qui ont fait une étude comparative de la structure microscopique et, en outre, des qualités physiques qui sont déterminées au moyen des éprouvettes tournées. La structure microscopique d'un grain uniformément fin s'obtiendra seulement lorsqu'on aura donné à l'acier les meilleures qualités physiques, au moyen d'un chauffage convenable. Cette structure est accompagnée invariablement du plus grand pourcentage de striction qu'il soit possible d'obtenir de n'importe quelle classe d'acier.

12. Essais de flexion. — Aucun essai de flexion n'est compris dans les spécifications pour essieux, bandages et rails. Les essais de flexion qui sont demandés dans les six autres spécifications pour l'acier sont comparés dans la table III, où la lettre T dénote l'épaisseur de l'éprouvette à courber, et la lettre D le diamètre du rond autour duquel l'éprouvette est courbée. Pour l'acier Martin-Siemens à plaques de chaudière et à rivets, les essais de flexion indiqués dans la table sont exigés, aussi bien après que l'éprouvette aura été trempée qu'avant, dans son état naturel. Dans tous les autres cas, les essais de flexion à froid, indiqués dans la table, doivent être faits avec des éprouvettes à courber, qui n'auront pas été traitées et qui auront été prises dans le produit fini.

L'essai de flexion à froid est une indication utile de la structure du métal, et à cet égard il a des rapports très rapprochés avec la striction. Tous les deux sont des indications de la même qualité du métal, c'est-à-dire, sa capacité d'être tiré à froid. Un acier capable d'une grande striction supporte toujours un essai de flexion sérieux et à froid, et, réciproquement, un acier capable de supporter un essai sérieux et à froid montre toujours une grande striction. Ceci rend particulièrement utile l'essai de flexion à froid, parce qu'il fournit une indication de la structure du métal, dans les cas où il y a de la difficulté à obtenir aisément une mesure exacte de la striction.

13. Essais au choc. — Les spécifications pour essieux, bandages et rails demandent un essai au choc, et dans la spécification pour pièces d'acier fondues, il est dit qu'un essai à outrance peut être substitué à un essai de traction, lorsqu'il s'agit de pièces fondues petites ou peu importantes. Aucune des autres spécifications ne comprend un essai au choc.

Un essieu doit supporter un certain nombre de coups de hauteurs spécifiées, sans qu'il se casse et sans qu'il dépasse, comme résultat du premier coup, une déflexion donnée. Ces demandes, qui varient selon le diamètre de l'essieu, sont indiquées dans la spécification. Un bandage doit supporter, sans qu'il se casse ni se fêle, une suite de coups de hauteurs grandissantes jusqu'à ce qu'il développe une déflexion égale à $D^2 \div (40T^2 + 2D)$, où D représente le diamètre intérieur du bandage et T son épaisseur au centre de sa surface de roulement. Un rail ne doit ni se casser ni se fêler par suite d'un seul coup de hauteurs qui varient selon la section du rail, comme il est indiqué en détail dans la spécification pour rails.

Les parties des machines à essayer par le choc, sujettes à être spécifiées, sont mentionnées dans le paragraphe 37.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les essais au choc sont compris dans les spécifications pour essieux, bandages et rails, parce que le comité a parfaitement réalisé que les métaux qui auront à supporter des coups et des chocs dans l'emploi auquel ils sont destinés, doivent être essayés par le choc. Dans chaque cas où l'essai au choc est adopté, c'est en conformité avec la pratique générale en Amérique, qui, après une expérimentation de plusieurs années, en a reconnu avoir donné des résultats très satisfaisants.

14. Essai d'homogénéité. — Cet essai n'existe que pour l'acier à foyers de chaudière. Il a pour but de faire voir l'uniformité du métal, c'est-à-dire l'absence de soufflures fermées ou en partie soudées, de creux et de scorie. Un échantillon pris à une éprouvette cassée dans l'essai de traction, ne doit montrer ni une seule gerçure défectueuse ni une raie de scorie, qui ait une longueur de plus de $6^{mm},35$ dans n'importe laquelle des trois fractures obtenues dans l'essai, comme il est décrit dans le paragraphe 27, page 23, ou dans le texte de la spécification pour acier Martin-Siemens à plaques de chaudière et à rivets.

15. Essai par la percussion. — Cet essai n'est spécifié que pour les grandes pièces d'acier fondues. On suspend la pièce fondue et on la martèle en plusieurs endroits. Le but de l'essai est de localiser les fêlures, les soufflures, les défauts ou les faiblesses dans la pièce fondue, s'il en existe.

IV. — Éprouvettes et conditions d'essai spécifiées

16. Éprouvettes de traction. — L'éprouvette tournée normale d'un diamètre de $12^{mm},7$ et d'une longueur mesurée de $50^{mm},8$ (voir le dessin I) est prescrite dans les spécifications pour pièces d'acier fondues, essieux, pièces forgées et bandages.

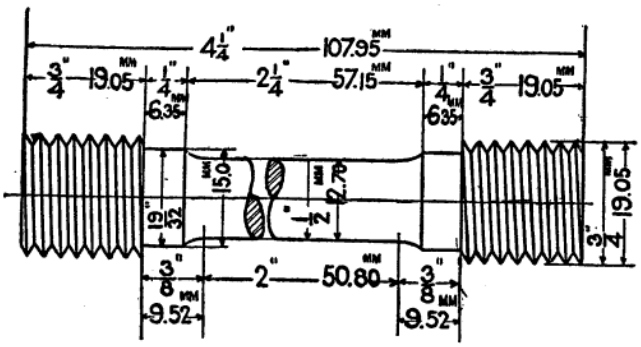


Fig. 1.

Il y a beaucoup à dire en faveur de l'adoption générale de cette éprouvette d'une longueur mesurée égale à quatre fois son diamètre, pour l'essayage pratique de ces quatre classes d'acier. Dans le cas des essieux et de toutes les pièces d'acier forgées, pour avoir une éprouvette longitudinale de ladite grandeur, il faut une prolongation de la pièce forgée moindre que pour avoir une éprouvette d'une longueur mesurée de $203^{mm},2$. L'éprouvette courte épargne donc beaucoup de métal au fabricant, parce qu'il y a moins de déchet; ce qui importe beaucoup à l'acheteur, lorsqu'il s'agit de pièces forgées de grands diamètres.

Ensuite il faut moins de temps et de travail pour découper et dresser l'éprouvette courte. On peut donc obtenir au même prix une bien meilleure idée de la qualité du métal, car on peut prendre plusieurs éprouvettes courtes dans différentes parties d'une importante pièce fondue ou forgée au même prix que coûterait une seule éprouvette longue, en ce qui regarde la préparation.

L'éprouvette courte a aussi le grand avantage de mettre l'acheteur à même de déterminer le caractère du métal à des endroits d'une pièce fondue ou d'une pièce forgée, présentant une certaine complication, dans lesquels il n'y a pas assez d'espace pour en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tirer une éprouvette longue, comme, par exemple, entre les bras des arbres. Lorsqu'il s'agit de bandages d'acier, l'éprouvette courte est de beaucoup préférable, car, si on veut découper l'éprouvette longue de l'anneau du bandage employé pour l'essai au choc, c'est très rare qu'on l'obtienne sans réchauffer et redresser d'abord le bandage, opération qui ôte à l'éprouvette sa valeur comme éprouvette représentative des bandages à l'état fini de la même fusion.

Enfin, si l'on se sert de l'éprouvette normale qui est recommandée ici, on pourra déterminer exactement et facilement les propriétés physiques exigées dans les spécifications pour pièces d'acier fondues, essieux, pièces forgées et bandages; car, dans les cas où la limite d'élasticité proportionnelle est spécifiée, au lieu de la limite élastique apparente, un appareil où on peut noter jusqu'à 25 dix-millièmes d'un millimètre (0,0025 millimètres) peut être attaché avec facilité et les computations peuvent être faites sans peine. La détermination de la résistance de traction n'est pas matériellement affectée par la longueur de l'éprouvette. Le pourcentage de striction et la qualité de la fracture, tous les deux des facteurs importants pour la détermination de la qualité du métal, sont indiqués par l'éprouvette courte aussi exactement et aussi clairement que par la longue. Les plus grands pourcentages d'allongement qu'on obtient, en se servant d'une éprouvette de $50^{mm},80$, sont contrebalancés par des demandes proportionnellement plus exigeantes dans les spécifications. Il n'y a donc dans la pratique aucune objection contre l'adoption générale, pour l'essayage ordinaire de ces quatre classes de produits, de l'éprouvette qui est représentée dans le dessin I.

Pour les plaques cisaillées mentionnées dans les spécifications pour acier de construction d'édifices, ponts et navires, et pour acier Martin-Siemens à plaques, les spécifications exigent une éprouvette normale d'une longueur mesurée de $203^{mm},2$, comme on voit dans le dessin II. Pour les produits autres que les plaques cisaillées, ces trois spécifications

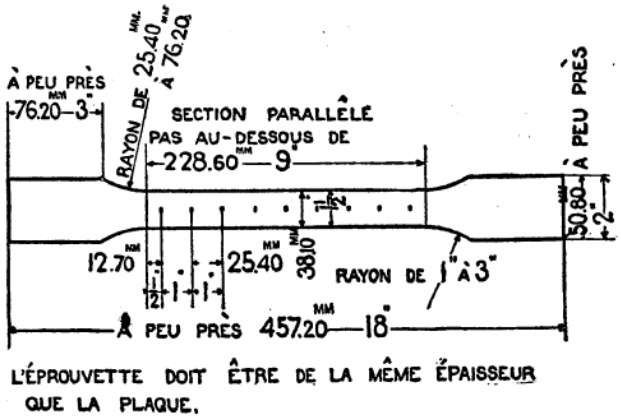


Fig. 2.

permettent que l'éprouvette soit pareille à celle qui est représentée dans le dessin II, qu'elle soit parée ou tournée de manière à avoir une grosseur uniforme dans toute sa longueur; et, là où il sera possible, les deux côtés opposés de l'éprouvette seront les surfaces de laminage. Les trois spécifications stipulent en outre que les ronds à rivets et les petites barres laminées doivent être éprouvés en gardant toute leur grandeur de laminage. Dans la spécification pour plaques de jonction, il n'est pas spécifié si l'éprouvette doit être parée de manière à avoir une grosseur uniforme dans toute sa longueur, ou si elle doit avoir la forme indiquée dans le dessin II. A cause de la forme de la section des plaques de jonction, l'éprouvette aux côtés parallèles est obtenue plus facilement. Néanmoins, avec toutes ces variations qui sont nécessaires, à cause de la forme de l'éprouvette montrée dans le dessin II, on exige la même longueur mesurée de $203^{mm},2$.

L'éprouvette normale représentée dans le dessin II a déjà été adoptée si généralement pour l'essayage pratique de toutes les espèces de plaques cisaillées, qu'il est presque inutile de faire des arguments en sa faveur. Actuellement la production de l'acier pour construc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion et à plaques est immense. Pour préparer beaucoup d'éprouvettes, sans retarder l'expédition du produit fini, il faut qu'on adopte une éprouvette de grandeur universellement adoptée. Alors on pourra préparer les éprouvettes par groupes, provenant des coupons de plaques d'épaisseur variée, en se servant de machines spéciales. La faculté de comparer les propriétés physiques d'une telle variété d'acier de divers fabricants, laquelle est rendue possible par l'emploi de l'éprouvette normale, constitue un des arguments les plus forts en faveur de son adoption générale.

17. Quantité d'éprouvettes de traction. — Dans les spécifications pour essieux à roues motrices, bandages, acier pour construction d'édifices, acier pour construction de ponts et navires, acier Martin-Siemens à plaques et à rivets et plaques de jonction, il est recommandé une éprouvette à essai de traction de chaque fusion. Quant à l'acier Martin-Siemens à plaques et à rivets, une éprouvette est prise dans chaque plaque et deux éprouvettes dans chaque fusion de ronds à rivets. La spécification pour pièces fondues et celle pour pièces forgées déclarent que le nombre des éprouvettes à essai de traction doit dépendre du caractère et de l'importance de la pièce fondue ou de celle forgée; et, pour cela, la quantité doit être réglée selon les cas spéciaux.

18. Provenance d'éprouvettes à essai de traction. — Les spécifications pour acier pour construction d'édifices, pour construction de ponts et navires, acier Martin-Siemens à plaques et à rivets et plaques de jonction, ne contiennent pas d'indication en ce qui concerne la provenance de l'éprouvette à essai de traction. Quant aux essieux de roues motrices et aux pièces forgées, il est stipulé que l'éprouvette à essai de traction soit coupée dans le sens longitudinal et que le centre de l'éprouvette soit à moitié distance entre le centre et l'extérieur de l'essieu ou de la pièce forgée. Lorsque les pièces forgées auront de grands bouts ou cols, les éprouvettes seront prises dans une prolongation du même diamètre ou de la même grosseur que ceux des pièces forgées derrière le grand bout ou col. Pour les arbres creux ou forgés ou forés, l'éprouvette sera prise dans la section finie prolongée, à moitié distance entre les surfaces intérieure et extérieure des parois de la pièce forgée.

Dans le cas des pièces d'acier fondues, il est spécifié que l'éprouvette à essai de traction doit être découpée à froid d'un témoin qui doit être moulé et fondu sur une portion d'une ou de plusieurs pièces fondues de chaque fusion, ou bien des masselottes, pourvu que celles-ci soient assez grandes pour être utilisées. Quant aux bandages d'acier, l'éprouvette sera découpée à froid du bandage éprouvé au choc, ou, si aucun essai au choc n'est exigé, l'éprouvette sera forgée d'un lingot fondu à cet effet lors de la fusion. Ce lingot à essai doit être soumis, autant que possible, à la même proportion de réduction que les lingots avec lesquels sont fabriqués les bandages.

19. Recuisson d'éprouvettes à essai de traction. — La spécification pour pièces d'acier fondues déclare que le témoin ou la masselotte doivent être soumis au même traitement que la pièce ou les pièces fondues, avant que l'éprouvette en soit découpée, et avant que le témoin ou la masselotte soient détachés de la pièce fondue. Les spécifications pour acier pour construction d'édifices, et acier pour construction de ponts et navires exigent que le métal, qui doit être employé sans recuisson ni autre traitement, soit éprouvé par l'essai de traction à l'état dans lequel il sort des laminoirs. Au contraire, pour le métal destiné à être recuit ou traité autrement avant d'être employé, une section, grandeur naturelle, de la longueur de l'éprouvette à essai de traction, sera traitée de la même façon avant que l'éprouvette à essai de traction en soit découpée.

20. Méthodes d'essais de traction. — Aucune des spécifications ne prescrit les méthodes à employer pour déterminer la résistance de traction, l'allongement ou la striction. Toutes les spécifications où la limite élastique apparente est comprise dans les propriétés physiques prescrites déclarent que la limite élastique apparente doit être déterminée par l'observation exacte de la chute du levier ou l'arrêt dans le manomètre de la machine à essayer. Dans la spécification pour pièces d'acier forgées, où la limite d'élasticité proportionnelle est exigée dans quelques cas, il est stipulé que la limite d'élasticité proportionnelle doit être

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déterminée au moyen d'un extensomètre qui sera attaché à l'éprouvette de façon à indiquer le changement dans la raison de l'extension sous une raison uniforme de chargement, et sera prise au point où la proportionnalité change. La pratique actuelle et générale des aciéries américaines pour la détermination des propriétés physiques du fer et de l'acier, est discutée dans les paragraphes nos 36 à 49.

21. Éprouvettes pour essais de flexion. — Comme il est dit au paragraphe n° 12, aucun essai de flexion n'est compris dans les spécifications pour essieux, bandages et rails. On a cru inutile de spécifier la longueur de l'éprouvette à courber, dans n'importe quel cas. Pour les pièces fondues et celles forgées, une éprouvette large de 25mm,40 et épaisse de 12mm,70 est spécifiée. Pour l'acier pour construction d'édifices, l'acier pour construction de ponts et navires et l'acier Martin-Siemens à plaques et à rivets, il est spécifié que l'éprouvette à courber sera large de 38mm,10, si possible; et, en outre, que, pour le métal ayant une épaisseur de 19mm,05 et au-dessous, l'éprouvette gardera aux deux côtés opposés la surface naturelle de laminage. Au contraire, pour le métal épais de plus de 19mm,05, l'éprouvette aura une épaisseur de 12mm,70. Chacune de ces trois spécifications déclare que les essais de flexion des ronds à rivets seront faits avec des éprouvettes qui gardent toute leur grandeur de laminage. Pour les plaques de jonction, aucune grandeur spéciale n'est exigée, au cas où l'éprouvette est découpée de la tête de la plaque de jonction. Si l'on préfère, l'essai de flexion pourra se faire avec une plaque de jonction non poinçonnée, et on devra l'élargir avant l'essai, s'il le faut.

22. Nombre d'éprouvettes à essai de flexion. — Les spécifications pour acier pour construction d'édifices, acier pour construction de ponts et navires et pour plaques de jonction, déclarent qu'une éprouvette à essai de flexion doit être prise dans chaque fusion. Pour l'acier Martin-Siemens à plaques et à rivets, une éprouvette à essai de flexion à froid et une éprouvette à essai de flexion après trempe seront prises dans chaque plaque comme elle sort des laminoirs; et pour ronds à rivets, deux éprouvettes à essai de flexion à froid et deux éprouvettes à essai de flexion après trempe seront fournies par chaque fusion. Les spécifications pour pièces fondues et pièces forgées disent que le nombre des éprouvettes à essai de flexion dépendra du caractère et de l'importance de la pièce fondue et de la pièce forgée.

23. Provenance d'éprouvettes à essai de flexion. — Aucun endroit spécial où on doit prendre l'éprouvette à essai de flexion n'est mentionné dans les spécifications pour acier pour construction d'édifices, ponts et navires, et pour l'acier Martin-Siemens à plaques et à rivets. Quant aux plaques de jonction, l'éprouvette peut être de la plaque de jonction, ou, si l'on préfère, l'essai de flexion peut se faire avec une plaque de jonction non poinçonnée, laquelle sera élargie, s'il le faut, avant d'être éprouvée. Lorsque les pièces forgées auront de grands bouts ou cols, les éprouvettes seront prises dans une prolongation ayant le même diamètre que celui de la pièce forgée, derrière le grand bout ou col. Quant aux arbres creux, ou forgés ou forés, l'éprouvette sera prise dans une prolongation de la section finie, à moitié distance entre les surfaces intérieure et extérieure des parois de la pièce forgée. Pour les pièces d'acier fondues, il est spécifié que l'éprouvette à essai de traction sera découpée à froid d'un coupon qui aura été moulé et fondu sur une portion d'une ou de plusieurs pièces fondues de chaque fusion, ou bien, des masselottes (pourvu que celles-ci soient assez grandes pour être utilisées).

24. Recuisson d'éprouvettes à essai de flexion. — La spécification pour pièces d'acier fondues déclare que le témoin ou la masselotte devront subir le même traitement que la pièce ou les pièces fondues, avant que l'éprouvette soit découpée, et avant que le témoin ou la masselotte soient détachés de la pièce fondue. Pour les pièces forgées, l'éprouvette à essai de traction sera découpée d'une prolongation de la pièce forgée après qu'elle aura été finie et traitée. Pour les plaques de jonction, l'acier pour construction d'édifices, ponts et navires, et l'acier Martin-Siemens à plaques et à rivets, il est spécifié que l'éprouvette sera tirée du métal à l'état dans lequel il sort des laminoirs, même si le métal doit être recuit plus tard, ce qui est le cas avec les barres à œillet.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

25. Méthodes d'essais de flexion. — Dans chacune des six spécifications où on exige un essai de flexion, se trouve la phrase suivante : « L'essai de flexion pourra se faire par la pression ou par des coups. » Les méthodes employées dans les aciéries américaines pour les essais de flexion sont expliquées au paragraphe n° 48.

26. Méthodes d'essais au choc. — Les essais au choc exigés pour essieux, bandages, rails et pièces fondues, sont notés dans le paragraphe n° 13. Dans chaque cas un échantillon du métal fini et prêt à être expédié doit être soumis à l'essai; en ce qui regarde les rails, il est spécifié que la longueur du fragment à soumettre à l'essai ne dépassera pas $1^{m},83$.

Pour éprouver les essieux et les bandages, on en choisit un de chaque fusion. Pour éprouver les rails, un fragment de rail est choisi dans un groupe composé des rails de cinq fusions. Il y a une provision pour l'essai des autres fusions du groupe, en cas que les trois rails de la fusion qui aura été éprouvée la première ne réussissent pas. Pour les pièces d'acier fondues où l'essai au choc ou l'essai à outrance remplace l'essai de traction, trois pièces fondues d'un lot sont éprouvées. Le « lot » consiste en toutes les pièces fondues de la même fusion, et recuites dans la même charge de fourneau.

Les bandages à soumettre à l'essai sont placés au-dessous du pilon, dans la position verticale pour rouler, et sur une base solide du poids de $10^{t},16$ métriques, au moins, et ils seront soumis à des coups successifs d'un mouton pesant 1016 kilogrammes, qui tombe de hauteurs grandissantes jusqu'à ce que la flexion exigée soit réalisée. Les rails sont placés, la tête en haut, sur des supports solides espacés de $0^{m},914$. Il est spécifié que l'enclume doit peser au moins $9^{t},7$ métriques, que les supports doivent en faire partie ou y être attachés fermement et, en outre, que le mouton doit peser $907^{kg},18$, et que sa face percutante doit avoir un rayon ne dépassant pas 127 millimètres. Les machines dont on se sert en Amérique varient un peu en ce qui concerne d'autres détails non essentiels.

Les essieux sont placés sur des supports espacés de $0^{m},914$, de manière que le mouton les frappe à moitié distance des bouts. L'enclume doit peser $7^{t},94$ métriques, et le mouton $743^{kg},89$. Le rayon des supports et de la face percutante du mouton dans le sens de l'axe de l'essieu doit être de 127 millimètres. L'enclume repose sur douze ressorts en hélice; ceux-ci reposent sur une base en fonte qui, à son tour, est placée sur un fondement solide. L'enclume doit pouvoir fonctionner en sens vertical. Chacun des douze ressorts a un diamètre extérieur de $203^{mm},2$ et consiste en cinq replis d'une barre ayant $30^{mm},16$ de diamètre, aussi bien que de sept replis d'une barre de $20^{mm},64$ de diamètre. La hauteur normale du ressort est de $231^{mm},77$, et sa hauteur sous une charge de $3016^{kg},38$, de $177^{mm},80$. On s'en sert en général aux États-Unis pour l'essai des essieux, et l'Association des maîtres-constructeurs de wagons des États-Unis la recommande. La spécification pour essieux donne en détail la méthode d'après laquelle les déflexions demandées pour les essieux de différentes grandeurs doivent être mesurées.

27. Méthode d'essai d'homogénéité. — Une partie de l'éprouvette cassée dans l'essai de traction est employée pour faire l'essai d'homogénéité qui est requis dans le cas de l'acier à foyers. Trois entailles transversales profondes d'à peu près $1^{mm},59$, sont faites dans l'acier ou en l'encochant avec un ciseau ou au moyen d'une machine. La première entaille se trouve à $50^{mm},80$ du bout carré de l'éprouvette; la deuxième, à $50^{mm},80$ plus loin, mais sur le côté opposé, et la troisième, à $50^{mm},80$ de la deuxième entaille, mais sur l'autre côté. L'essai se fait en serrant fermement l'éprouvette dans l'étau de sorte que la première entaille se trouve à environ $6^{mm},35$ au-dessus des mâchoires, et en courbant l'éprouvette vers le côté opposé à celui de l'entaille, au moyen d'un marteau avec lequel on frappe quelques coups légers, jusqu'à ce que l'éprouvette se rompe. L'éprouvette est cassée aux deux autres entailles par le même procédé. L'absence de soufflures demandée dans ces trois fractures est décrite dans le paragraphe n° 14.

28. Méthode d'essai par la percussion. — Cet essai pour les grandes pièces d'acier fondues consiste simplement à suspendre et à marteler la pièce fondue à de nombreux endroits afin de localiser les défauts, comme il a été indiqué dans le paragraphe n° 15.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

29. Échantillons pour analyse chimique. — Chacune des neuf spécifications pour acier contient un paragraphe qui définit la provenance des copeaux ou de la tournure qu'on prend pour déterminer si le métal se conforme, ou non, aux demandes chimiques prescrites. Les spécifications pour acier pour construction d'édifices, ponts et navires, acier à plaques de jonction et pour rails d'acier, déclarent que les copeaux doivent être pris dans le petit lingot à essai, fondu lorsqu'on coule la fusion. Toutes les autres spécifications permettent que les copeaux se prennent dans le petit lingot à essai, si l'inspecteur le préfère; mais elles spécifient d'autres provenances, comme suit : Pour les pièces fondues et celles forgées, la tournure provenant de l'éprouvette à essai de traction ou des copeaux de l'éprouvette à essai de flexion peuvent être employés. Quant aux bandages d'acier, la tournure provenant ou de l'éprouvette à essai de traction ou du bandage même peut être employée. Quant aux essieux d'acier, on recommande pour les essieux à roues motrices la tournure de l'éprouvette à essai de traction, et pour les essieux à wagons, à machines et à trucks de tender, les copeaux longitudinaux pris à moitié distance entre le centre et l'extérieur de l'essieu. La spécification pour acier Martin-Siemens à plaques de chaudière et à rivets permet, en ce qui concerne l'acier à foyers de locomotive, qu'une autre analyse pour vérifier l'analyse avec le petit lingot à essai puisse être faite avec la tournure de l'éprouvette à essai de traction, qui est prise dans chaque plaque à l'état dans lequel elle a été laminée; et, pour d'autre métal, avec la tournure provenant d'une éprouvette à essai de traction de chaque fusion.

Pour les rails d'acier, plaques de jonction et acier pour construction d'édifices, ponts et navires, il convient de limiter les analyses aux copeaux provenant du lingot à essai qui est coulé pendant le coulage de la fusion; car, dans ces cas, c'est le seul moyen d'avoir un échantillon représentatif de chaque fusion. Tous ceux qui ont étudié les variations inévitables de la composition chimique des différentes parties d'une section de rail, par exemple, le bas de la semelle, le haut de la tête et le centre de la tête, ne prétendront certainement pas que l'analyse des copeaux d'un rail soit représentative de la fusion dont on s'est servi pour en faire le rail. Et encore, malgré un pourcentage convenable de déchet, il y a une variation, en fait de sa composition chimique, dans le rail, du haut et du bas du même lingot. On peut en dire autant des plaques de jonction et des aciers de construction.

Même pour le lingot à essai il faut avoir soin d'éviter la ségrégation et d'obtenir un échantillon général et représentatif. Toutes les fois que l'acier dans les petits moules à lingots à essai montre une tendance prononcée à bouillonner, il est bon de le calmer en y ajoutant une quantité infime d'aluminium métallique pur, car autrement les copeaux, pris près des soufflures, pour déterminer la teneur en carbone donneront des résultats trompeurs. Il vaut mieux aussi laminer ou marteler le lingot à essai en forme de barre et faire un trou à travers la barre que d'obtenir les copeaux pour l'analyse du lingot même à essai. Si on prend ces précautions, on peut se fier au lingot à essai; il fournira alors un échantillon général et représentatif de la fusion de l'acier.

30. Méthodes d'analyse chimique. — Toute suggestion à propos des méthodes d'analyse chimique a été omise à dessein des spécifications en question. Il est probable qu'une uniformité complète dans les détails des diverses méthodes analytiques employées dans les laboratoires des aciéries ne sera jamais réalisée; et cela n'est pas nécessaire pour qu'on ait des analyses[1] exactes dans la pratique.

Les chimistes analytiques dans les aciéries méritent d'être grandement loués du succès qui a suivi leurs efforts de satisfaire les demandes urgentes qu'on leur a faites, pour avoir des analyses exactes et rapides, car par cela ils ont aidé matériellement le fabricant d'acier à se procurer et à maintenir de l'uniformité dans ses produits. Un résumé bref des méthodes le plus généralement en usage de l'analyse de l'acier dans les laboratoires des aciéries américaines se trouve dans la section XI, pages 139 et suivantes.

1. Le lecteur est renvoyé à l'excellent travail du baron Hanns Juptner von Jonstorff, intitulé *The Introduction of Standard Methods of Analysis.* Voir le *Journal of the Iron and Steel Institute*, n° 1, 1896, pp. 80-138.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

V. — Variation de poids

31. La variation de poids, qui est permise dans le laminage des plaques, est comprise, comme il faut, dans les spécifications pour acier pour construction d'édifices, ponts et navires, et pour acier Martin-Siemens à plaques et à rivets. L'excédent de poids est causé par l'usure inévitable des laminoirs à plaques, car on fait d'ordinaire les plaques un peu plus épaisses au centre que vers les côtés. Une norme d'excellence prescrite à cet égard met tous les fabricants sur un pied d'égalité, et exige qu'ils aient toujours leurs laminoirs à plaques en bon état. Les tolérances sont fondées sur la supposition que $16^{cm},39$ cubes d'acier pèsent $0^{kg},128\,502$. On pourvoit au cas où les plaques seraient commandées au poids, aussi bien qu'à l'épaisseur. Les variations prescrites sont les mêmes dans chacune de trois spécifications comme il convient.

VI. — Finissage

32. Il y a une telle grande variété de métal fini qui est comprise dans les neuf spécifications pour acier dont il est question, qu'il est impossible de faire un sommaire des phrases qui se trouvent sous ce titre. Dans chaque cas, les demandes sont conçues dans de tels termes que seul le métal fini d'une manière conforme à l'usage des ouvriers et exempt d'imperfections préjudiciables doit être accepté. Dans la spécification pour rails, la question de finissage est traitée sous des subdivisions, à savoir : « section, poids, longueur, forure et finissage ». Les rails de deuxième qualité, ou n° 2, sont définis aussi.

VII. Marque

33. Le marquage du métal fini est à présent généralement usité. Il permet d'identifier le métal et de se rendre compte de la date de la fabrication du métal qui aura rendu un service exceptionnellement bon ou long, ou qui aura manqué de le rendre. C'est donc une protection et une réclame pour le fabricant honorable. Sous ce titre, un examen des neuf spécifications pour acier fait voir que dans tous les cas, excepté pièces fondues et pièces forgées, toutes les pièces finies doivent être marquées; mais que les petites pièces peuvent être expédiées en paquets fermement liés avec du fil de fer, pourvues du numéro de la fusion marqué sur une étiquette en métal. Pour les rails, outre le numéro de la fusion qui doit être estampé sur le rail, le nom du fabricant, le mois et l'année de fabrication doivent être laminés en lettres saillantes sur le côté de la tige de chaque rail. Quant aux plaques de jonction, le nom du fabricant et l'année de fabrication doivent être laminés en lettres saillantes sur le côté de chaque plaque. Pour les essieux, outre le numéro de la fusion, les initiales du fabricant doivent être estampées sur chaque essieu, et, pour les bandages, la marque du fabricant, aussi bien que le numéro, doivent être estampés sur chaque essieu fini.

VIII. — Inspection

34. Chaque spécification fournit d'amples précautions pour assurer à l'inspecteur toutes les facilités qu'il faut pour bien inspecter le produit.

IX. — Spécification pour fer forgé

35. On n'a pas pu faire entrer cette spécification dans l'examen précédent des neuf spécifications pour acier sous les titres uniformes et communs à toutes. Un sommaire distinct des propriétés physiques demandées, des éprouvettes et des méthodes d'essai, n'est pas indispensable; donc on renvoie le lecteur au texte complet de la spécification qui se trouve dans l'appendice.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

X. — Pratique courante et générale des aciéries américaines pour déterminer les propriétés physiques du fer et de l'acier

36. Introduction. — Les déclarations suivantes sont fondées sur des réponses à une série de questions adressées à trente-trois aciéries qui, en 1899, fabriquèrent plus de 75 % de l'acier Martin-Siemens et Bessemer aux États-Unis. Les faits qu'on présente ici peuvent donc être acceptés comme représentant bien les méthodes commerciales employées actuellement aux États-Unis pour déterminer les propriétés physiques du fer et de l'acier.

Dans la discussion suivante ces méthodes commerciales sont comparées, où c'est possible, aux conclusions par rapport à l'essai des métaux, adoptées en 1894 par la « Commission (française) des méthodes d'essai des matériaux de construction », instituée le 9 novembre 1891, par un décret publié par le Président de la République française et aux résolutions des Congrès internationaux qui eurent lieu à Munich en 1884 et 1885, à Dresde en 1886, à Berlin en 1890, et à Vienne en 1893.

Les recommandations contenues dans le rapport du comité de la Société américaine des Ingénieurs Mécaniciens, sur les « essais et méthodes normaux d'essais de matériaux », ne sont pas comprises dans cette discussion, par la raison que le rapport n'a jamais été approuvé ni même discuté à fond par la Société[1].

37. Machines d'essai. — Les trente-trois aciéries possèdent en tout soixante-treize machines à essayer qui varient de 59 kilogrammes à 181 437 kilogrammes de capacité. Toutes ces machines sont de manufacture américaine. Il y a six fabricants de machines à essayer qui sont représentés dans ces trente-trois.

Soixante-deux des soixante-treize machines à essai fonctionnent au moyen d'une vis, et les onze autres par pression hydraulique. Avec les deux méthodes, en maniant bien les machines, on peut éviter l'action subite de la charge qui ressemble à un choc. Cette partie caractéristique de la machine est recommandée et par la Commission française et par les Congrès.

Avec cinquante-cinq des soixante-treize machines d'essai, on ajoute le contrepoids à la main; avec les autres dix-huit machines, c'est par action automatique qu'on l'ajoute. Les Congrès déclarent qu'en effet aucun mécanisme distinct qui rend la machine automatique n'est nécessaire.

Les Congrès déclarent que les machines doivent être disposées de manière que leur ajustement puisse être vérifié avec facilité et certitude. Cet ajustement est aussi caractéristique de toutes les machines américaines.

38. Méthodes d'attacher l'éprouvette à essai de traction. — Les Congrès donnent des indications explicites sur les modes d'attacher les éprouvettes à essai de traction. L'ajustement doit permettre autant que possible une distribution uniforme de tension dans la section transversale. Il faut qu'il y ait du jeu et du mouvement aisé, afin qu'on puisse mettre au commencement de la tension l'éprouvette dans la position voulue, et on ne doit jamais se servir de coins à griffes qui s'enfoncent dans l'éprouvette.

Ils recommandent des coussinets sphériques pour les éprouvettes rondes, et des trous à boulons et des boulons pour les barres plates, ou bien des têtes cordonnées affermies par des coins appropriés.

La Commission française ne défend pas d'employer des coins à griffes.

Les réponses des trente-trois aciéries américaines révèlent une déviation complète des recommandations des Congrès. Des coins à griffes, à entailles en forme de V, sont généralement employés pour les éprouvettes rondes comme elles auront été laminées, et des têtes de vis pour les éprouvettes tournées. En Amérique, on ne se sert pas de trous à boulons et de boulons pour l'essayage commercial des éprouvettes plates. Des coins à la

1. Ce rapport fut présenté à la Société au mois de mai 1890, et se trouve dans les comptes rendus (*Transactions*), vol. XI, pp. 604-653, article n° 380. Le rapport est mentionné à tort par M. Baclé comme les « Recommandations de la Société américaine des Ingénieurs Mécaniciens », dans une admirable analyse comparative des Résolutions des Congrès internationaux et de la Commission française, publiée par lui en mars 1895.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

face fortement bombée et diagonalement serrés sont employés pour les éprouvettes plates. La face saillante des coins fait que l'éprouvette s'aligne, lorsqu'elle est soumise à une tension, et fait aussi que les dents s'enfoncent fermement dans le centre de la tête de l'éprouvette. C'est ainsi que l'éprouvette est empêchée de glisser et les côtés de l'éprouvette ne sont pas coupés; ainsi on évite tout danger d'une cassure prématurée causée par la coupe. Les serres à billes ont été adoptées pour la première fois dans les machines d'essai américaines. On a trouvé que des écailles, de la rouille, et d'autre crasse s'accumulent sans cesse autour des articulations et empêchent la liberté de mouvement qui est indispensable pour rendre l'invention utile. Pour cette cause, il y a longtemps qu'on les a généralement abandonnées, et on a trouvé que les formes actuelles des coins serrés suffisent à toutes les exigences pratiques.

39. Vitesse avec laquelle la charge s'applique dans les essais de traction. — Les trente-trois réponses montrent un manque d'uniformité dans la vitesse, exprimée en millimètres par minute, avec laquelle la charge est appliquée pour la détermination de la limite élastique apparente et de la résistance de traction de l'acier. Sans compter les machines à essayer le fil et les tubes, on trouve que 87 % des réponses font voir dans la pratique une vitesse qui ne dépasse pas $76^{mm},20$ par minute.

Les Congrès renvoient aux recherches sur ce sujet faites par Fischer, Hartig et Bauschinger; et, tout en admettant que la vitesse de l'essai influe sans doute sur le résultat de l'essai, surtout si on trace des diagrammes des éprouvettes de traction, ils concluent que, jusqu'à présent, la question n'a pas été suffisamment résolue pour qu'ils établissent une vitesse fixe pour l'essai du fer, du cuivre et du bronze. La Commission française ne donne pas de règle positive à l'égard de l'effet de la durée de l'essai, puisqu'elle trouve que le sujet n'est pas encore assez compris. Elle recommande cependant qu'on fasse plus de recherches sur ce sujet. Ces remarques s'appliquent aux essais scientifiques.

Quant aux essais pratiques, cependant, la difficulté d'obtenir un calibrage très exact des surfaces laminées, et le fait que les charges véritables sont mesurées rarement avec une approximation moindre qu'à 45 kilogrammes près, font que les résultats des essais de traction restent en effet les mêmes si on se rend compte des variations de vitesse employées dans les essais pratiques. Beaucoup d'expériences qu'on a faites, en suivant soigneusement les méthodes commerciales d'essai, montrent qu'une différence de vitesse de $25^{mm},4$ à $76^{mm},2$ par minute ne fait aucune différence matérielle dans la résistance de traction et dans l'allongement. La résistance de traction est légèrement augmentée et l'allongement est légèrement diminué par l'essai rapide.

40. Précision de calibrage d'éprouvette de traction. — En calibrant les éprouvettes à essai de traction, trente-deux des trente-trois aciéries mesurent à 25/1000 de 1 millimètre près. Dans le cas de l'éprouvette de traction de $12^{mm},7$ de diamètre, recommandée dans les spécifications pour pièces d'acier fondues, essieux, pièces forgées et bandages, une erreur de calibrage de 25/1000 de millimètre fait une différence de 225/1000 de kilogramme par millimètre carré, sur un acier d'une résistance de traction de $56^{kg},23$ par millimètre carré. Dans le cas de l'éprouvette de traction recommandée dans les spécifications pour acier à plaques et de construction, une erreur de 25/1000 de millimètre dans le calibrage de l'épaisseur de l'éprouvette fait une différence de 169/1000 de kilogramme par millimètre carré sur un acier d'une résistance de traction de $42^{kg},19$ par millimètre carré.

Les Congrès recommandent qu'on mesure à 1/10 de 1 millimètre près en déterminant les dimensions de la section transversale de l'éprouvette. La Commission française recommande une détermination avec une approximation en dessous de 5/100 de 1 millimètre dans le cas des dimensions égales à ou en dessous de 10 millimètres, et elle accepte une approximation ne dépassant pas 1/10 de 1 millimètre quand la longueur mesurée est au-dessus de 10 millimètres.

Les méthodes commerciales qui sont en usage dans les aciéries américaines pour le calibrage des éprouvettes de traction sont donc plus précises que ne sont celles recommandées ou par les Congrès ou par la Commission.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

41. Précision de mesurage de charges réelles. — Les charges réelles employées comme base pour calculer la limite élastique apparente et la résistance de traction par millimètre carré sont mesurées à $45^{kg},36$ près par 52 % des aciéries, à $22^{kg},68$ près par 9 %, et à $4^{kg},54$ près par 39 %; dans les 39 % sont compris les fabricants de fil et de tubes. Dans le cas d'un acier de résistance de traction de $56^{kg},25$ par millimètre carré, une différence de $45^{kg},36$ dans la charge réelle équivaut à $0^{kg},359$ par millimètre carré quand on se sert de l'éprouvette tournée normale de $12^{mm},7$ de diamètre. Dans le cas d'un acier à plaques de $42^{kg},19$ par millimètre carré, lorsqu'on emploie l'éprouvette normale d'une longueur mesurée de $203^{mm},2$, une différence de $45^{kg},36$ dans la charge réelle est égale à $0^{kg},188$ par millimètre carré.

Les Congrès déclarent qu'ils admettront une erreur de 1/10 de kilogramme par millimètre carré dans les mesures des charges réelles pour la computation de la limite élastique apparente et de la résistance de traction. La Commission française dit que les charges totales seront mesurées sur une approximation de 25 kilogrammes pour les efforts inférieurs à 5000 kilogrammes et avec une approximation de 50 kilogrammes pour les efforts supérieurs à cette charge; en d'autres termes, à 1/200 de l'effort total dans le premier cas, et dans l'autre à moins de 1/100.

La pratique usitée dans les aciéries américaines de mesurer les charges réelles avec une approximation de $45^{kg},36$ est, en réalité, aussi exacte que celle recommandée par les Congrès ou la Commission française, d'autant que les charges réelles mesurées dépassent d'ordinaire 4536 kilogrammes.

42. Précision de calcul de résistance de traction et de limite élastique apparente. — Quant au calibrage et au mesurage des charges dans les essais usités dans le commerce, les limites susdites d'exactitude indiquent qu'il n'est pas nécessaire de calculer la résistance de traction et la limite élastique apparente avec une approximation inférieure à $0^{kg},0703$ par millimètre carré. Les réponses à la question qui a trait à ce sujet montrent que 56 % des aciéries suivent cette pratique de calculer avec une approximation de $0^{kg},0703$ par millimètre carré. 6 % d'entre elles mesurent toutefois avec une approximation de $0^{kg},0351$ par millimètre carré, et pas moins de 38 % avec une approximation de $0^{kg},007$ par millimètre carré.

43. Précision de mesurage d'allongement. — Les réponses indiquent que 91 % des aciéries mesurent l'allongement total de l'éprouvette à $0^{mm},254$ près. Dans le cas de l'éprouvette normale de la longueur mesurée de $50^{mm},80$ et d'un acier de 20 % d'allongement, une différence de $0^{mm},254$ équivaut à une différence de 50/100 de 1 %. Dans le cas de l'éprouvette normale de la longueur mesurée de $203^{mm},2$ et d'un acier de 25 % d'allongement, une différence semblable dans l'allongement total équivaut à une différence de 125/1000 de 1 % d'allongement.

Les Congrès recommandent un peu plus d'exactitude dans les mesures que celle mentionnée ci-dessus, car elles déclarent que l'allongement au point de rupture doit être mesuré à 10 centièmes de 1 % près.

44. Précision de calcul d'allongement. — La pratique courante en Amérique, citée dans le paragraphe précédent, montre qu'il n'est pas nécessaire de calculer le pourcentage d'allongement sur une approximation inférieure à 10 centièmes de 1 %. Les réponses montrent que 60 % des aciéries observent cette pratique. 22 % d'entre elles calculent à 1 centième de 1 % près; 9 % à 25 centièmes de 1 %, et 7 % des aciéries calculent l'allongement à la moitié de 1 % près (0,50 %).

45. Précision de mesurage de striction. — Les réponses à cette question adressée aux aciéries font voir que la réduction totale au point de fracture est mesurée à $0^{mm},254$ près par 48 % des aciéries et à $0^{mm},025$ par 45 %. Les 7 % qui restent déclarent qu'on y mesure la réduction de l'aire avec une approximation de $2^{mm},54$. Dans le cas de l'éprouvette tournée normale, de $12^{mm},70$ de diamètre une différence de $0^{mm},025$ dans la mesure totale équivaut à 33 centièmes de 1 % de striction dans un acier de 20 % de contraction et à 20 centièmes de 1 % lorsque l'acier a une striction de 50 %.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les Congrès recommandent que la réduction de l'aire de la section transversale soit mesurée à 1 % près, ce qui constitue une tolérance bien plus grande que celle qui est en usage en Amérique dans les essais de pratique courante.

46. Précision de calcul de striction. — Comme il a été montré plus haut, il n'est pas nécessaire, en mesurant la striction à $0^{mm},254$ près, de calculer le pourcentage à plus de 20 centièmes de 1 % près. Les réponses reçues montrent que 77 % des aciéries ont adopté la pratique de calculer la striction à 10 centièmes de 1 % près. 19 % d'entre elles, à 1 centième de 1 %, et 3 % à 1 % près.

Un examen des paragraphes 37-46 inclusivement fait voir que les limites de précision des méthodes de pratique courante en Amérique pour déterminer les propriétés physiques du fer et de l'acier se comparent très favorablement aux recommandations des Congrès internationaux de la Commission française.

47. Méthodes pour déterminer la limite élastique apparente et la limite d'élasticité proportionnelle. — Les réponses des 33 aciéries révèlent que, dans la plupart des cas, la limite élastique apparente est déterminée seulement par la chute du levier ou par l'arrêt dans le manomètre de la machine à essayer. Lorsqu'une méthode autre que celle de la chute du levier est exigée, 31 % des aciéries rapportent qu'elles se servent de diviseurs et 15 % rapportent qu'elles se servent de quelques-unes des formes variées d'appareils spéciaux qui s'attachent à l'éprouvette de traction, au moyen desquels on peut déterminer avec précision la limite d'élasticité proportionnelle.

48. Méthodes d'essais de flexion. — Les Congrès recommandent que les essais de flexion s'effectuent au moyen d'un appareil mécanique qui fonctionne lentement et qui exerce un effort, ou par une pression au milieu entre deux appuis, ou par une pression latérale appliquée contre une des extrémités de l'éprouvette, tandis que l'autre extrémité de l'éprouvette est tenue fermement dans un étau. L'appareil doit être simple et capable de fonctionner rapidement. On doit pouvoir voir clairement la partie de l'éprouvette où a lieu le plus d'effort. La flexion doit s'effectuer d'une manière continue, et, lorsqu'elle se fait autour d'un mandrin, le diamètre dudit mandrin doit être aussi petit que possible.

Dans les aciéries, en Amérique, les essais de flexion s'effectuent à l'aide de coups de marteau plus souvent que par une pression uniforme. Pour courber les petites éprouvettes on se sert de marteaux d'enclume, et celles plus grandes sont courbées au moyen de marteaux à vapeur. Quelquefois on commence l'essai en se servant d'un marteau et on le finit à l'aide d'un marteau à vapeur. A peu près 20 % des 33 aciéries font savoir qu'elles effectuent leurs essais de flexion à l'aide de la pression hydraulique. On remarquera que les spécifications contenues dans l'appendice disent que les essais de flexion peuvent se faire par la pression ou par des coups. Les Congrès déclarent que la durée de l'essai de flexion n'est d'aucune importance.

49. Essais multiples ou de pièce. — Sous ce titre, les Congrès publient la déclaration suivante :

On doit recueillir autant de renseignements que possible dans le but de formuler des règles normales à l'égard des essais multiples ou de pièce (l'essai de chaque pièce d'un lot).

En déterminant les règles normales à l'égard des machines à essayer par le choc et des machines aux essais de résistance, on ne doit pas perdre de vue la possibilité de faire des essais multiples ou de pièce.

On doit considérer sous ce rapport non seulement les essieux, mais aussi tous les matériaux de construction en acier et en fer.

L'essai multiple ou de pièce, qui consiste à éprouver rapidement par un seul choc, par exemple, chaque pièce d'un lot, de telle façon qu'elle ne soit pas endommagée, offre certainement plus de garantie que celui qui consiste à éprouver tant pour cent des pièces d'un lot. Il y a longtemps qu'on l'a adopté pour ressorts, chaînes, tuyaux, tuyaux à vapeur, tubes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de chaudière, etc. Il a donné de bons résultats en Autriche, où il a été employé bien des fois pour essieux. On doit pourtant reconnaître que cette méthode présente de grandes difficultés à l'acheteur aussi bien qu'au vendeur, mais ces difficultés peuvent être surmontées par l'étude et l'adoption, dans la pratique, d'une méthode d'essai appropriée. Les seules expériences que l'on ait jusqu'ici à sa disposition, en ce qui regarde les essais multiples, ont été faites à Witkowitz, et elles ont fini par faire abandonner cette méthode d'essai. Néanmoins il est à désirer qu'on soit renseigné plus à fond sur cette méthode.

La lettre adressée aux aciéries américaines les pria de faire une déclaration détaillée de leurs expériences dans cette méthode d'essai.

Les réponses reçues montrent d'une manière concluante que l'essai de chaque pièce d'un lot, effectué de sorte que la pièce ne soit pas endommagée, n'est fait ou exigé que rarement en Amérique. Il y a dix-huit ans qu'on a abandonné en Amérique la pratique d'éprouver chaque barre à œillet, en la soumettant à un effort égal à celui qu'elle aurait à soutenir dans le service auquel elle était destinée. Les essieux ne sont pas soumis individuellement à des essais.

Il y a de certaines classes spéciales de ressorts en acier qui sont soumis chacun à l'essai. On mesure la longueur et la hauteur du ressort avant d'avoir appliqué la charge maximum de régime, et après. Parfois chaque tube de chaudière est soumis à une pression hydrostatique, et on examine chaque tube pour s'assurer qu'il n'y a ni fissure, ni faiblesse, ni imperfection; mais d'ordinaire on ne soumet à cet essai que trois sur chaque cent de tubes. Les chaînes sont éprouvées quelquefois; on les soumet à une charge de régime. Les tuyaux à eau, les cylindres, et les chaudières finies, sont soumis chacun à l'essai.

XI. — Méthodes en usage dans les aciéries américaines pour l'analyse chimique de l'acier

50. Introduction. — La description de toutes les méthodes en usage dans les laboratoires des fabriques d'acier américain, par lesquelles les déterminations satisfaisantes analytiques de plusieurs aciers essentiels sont faites, est beaucoup en avance de ce papier. En discutant les moyens pour l'analyse, il faut garder la différence entre les essais d'usine et les méthodes analytiques précises comme indiqué par von Juptner[1]. Les deux rangs de méthodes sont compris en celles choisies pour dépeindre, et en quelques cas la méthode donnée remplit toutes les demandes de chaque classe. Pour cette raison le temps occupé dans une détermination, et la limite de justesse, sont donnés en chaque cas, aussi bien que les réactions sur lesquelles la méthode est basée.

51. Détermination du carbone. — Deux méthodes pour la détermination du carbone dans l'acier seront dépeintes :

a. La *méthode gravimétrique*, par combustion en l'air dans le creuset de Shimer. Temps, 2 heures et 20 minutes. Justesse, 0,005 %.

b. La *méthode colorimétrique* d'Eggertz. Temps, 12 minutes. Justesse, de 0,01 à 0,03 % dépendant de la proportion de carbone dans l'acier.

a. Méthode gravimétrique de Shimer. — M. P.-W. Shimer remplace le tube de porcelaine ou de platine, ordinairement employé dans la détermination du carbone au moyen de combustion en oxygène, par un creuset de platine pourvu d'un bouchon de cuivre réfrigéré par l'eau, et une boucle de cuivre en planche adaptée exactement autour du sommet extrême du creuset. Cette boucle est bridée aux bords pour emporter l'eau qui s'écoule du bouchon. Une boucle de caoutchouc noir pur, exactement adaptée au bouchon, assure une jointure serrée. Pour les autres détails de cet appareil excellent de combustion, le lecteur est renvoyé à l'ouvrage de M. Shimer[2] et à l'illustration associée (figure III).

La combustion est faite dans l'air, au lieu d'oxygène. Le train de combustion est composé

1. *Loc. cit.*
2. *Jour. Am. Chem. Soc.*, vol. XXI, July, 1899, pp. 557-568.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des parties suivantes : 1° deux bouteilles d'aspiration, ou autres formes d'appareils, pour forcer l'air à travers le train; 2° les bulbes de Geissler contenant de l'hydroxyde de potassium; 3° bouteille à garde; 4° creuset de combustion, proprement uni au réservoir de l'eau et le tuyau de trop-plein; 5° le tube de laiton de 304mm,8 longueur et 6mm,4 diamètre; 152mm,4 du milieu du tube est rempli d'oxyde de cuivre, échauffé par un brûleur Bunsen avec tête étendue. Chaque bout de ce tube de laiton se refroidit par une enveloppe de mèches de lampe, qui se plonge dans des gobelets d'eau froide; 6° un tube à quatre bulbes 152mm,4 de longueur rempli de perles de verre qui se refroidit par mèches de lampe humides, ou pièces de drap de coton. Ce tube retient le chlore et l'acide chlorhydrique; 7° un tube de 152mm,4 de longueur rempli de chlorure de calcium; 8° les bulbes de Geissler attachées à un petit tube à chlorure de calcium; 9° un tube de garde à chlorure de calcium.

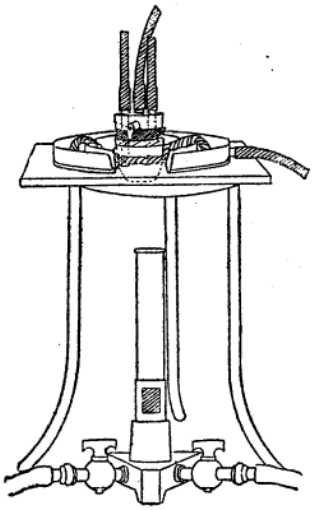


Fig. 3.

L'acier est dissous dans une solution de chlorure de cuivre et potassium acidulé. Avec un agitateur pour faciliter la dissolution de l'acier, creusets de Gooch et grande succion pour filtrer et pour enlever le carbone, l'étuve convenable pour dessécher et des grilles d'analyse complètes, dix-huit déterminations étaient faites par un homme travaillant 10 heures par jour, et une seule détermination était faite en 2 heures et 20 minutes, comptant du moment où les copeaux étaient donnés à l'opérateur. Cette méthode pour la détermination gravimétrique de carbone est juste jusqu'à 0,005 %.

b. Méthode colorimétrique d'Eggertz. — Cette méthode proposée par Eggertz en 1862[1] dépend de la profondeur de la couleur donnée par le carbone combiné à une dissolution de l'acier en acide azotique. Sans doute, cette méthode est la plus généralement employée, et en même temps abusée dans les laboratoires des usines en acier. Si les précautions générales qui suivent sont conduites, la méthode donnera les résultats satisfaisants dans les deux classes d'acier à grande et à petite teneur en carbone.

aa. L'acier modèle à carbone contenu exact et les échantillons pour essayer seraient d'une composition chimique semblable, spécialement en carbone et auraient reçu le même traitement mécanique.

bb. Les aciers à chaud auraient été complètement recuits et s'ils tenaient plus que 0,60 % en carbone ils seraient avantageusement durcis dans l'eau avant d'être recuits. L'acier modèle employé en ce cas aurait été recuit avant que les copeaux ou les tournures fussent pris.

1. *Jern-Kontorets Annalen* : 1862, p. 54; 1874, p. 176; 1881, p. 301; *Chem. News*, VII, p. 254; XLIV, p. 175.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cc. Les poids égaux de l'acier modèle et les échantillons pour analyse seraient pris et la même quantité d'acide azotique (Sp. Gr. 1.2) ajoutée au modèle et aux échantillons. Pendant la dissolution, les éprouvettes contenant les copeaux du modèle et des échantillons resteraient dans l'eau froide, et s'échaufferaient plus tard exactement dans les mêmes circonstances; les comparaisons dans les tubes gradués seraient faites promptement, après que les échantillons sont complètement dissous et les dissolutions refroidies.

dd. La quantité de l'acide azotique employée en dissolvant l'acier doit être variée avec le carbone contenu. La table suivante donnant la quantité de l'acide employé, la proportion de carbone contenue en acier modèle employé pour les aciers de carbone variant et la méthode d'ajuster la proportion de carbone dans les échantillons d'acier est le résultat d'une grande expérience avec la méthode d'Eggertz.

VARIATION EN PROPORTION DE CARBONE.	ACIDE AJOUTÉ en centimètres cubes.	POIDS EN GRAMMES.	PROPORTION DE CARBONE ACIER MODÈLE.	MODÈLE DÉLAYÉ EN TUBE DE COMPARAISON A	POUR CALCULER LA PROPORTION DE CARBONE EN ACIER ÉPROUVÉ. — Observation du tube gradué.
1,20 – 0,80	7	0,2	1,04	$20^{cm3},8$	Diviser par 20
0,79 – 0,60	6	0,2	0,68	$13^{cm3},6$	— 20
0,59 – 0,50	5	0,2	0,58	$11^{cm3},6$	— 20
0,49 – 0,40	5	0,2	0,49	$9^{cm3},8$	— 20
0,39 – 0,23	4	0,2	0,34	$6^{cm3},8$	— 20
0,22 – 0,14	4	0,2	0,201	$6^{cm3},7$	Multiplier par 0,03
0,13 – 0,10	3	0,2	0,114	$5^{cm3},7$	— 0,03
0,09 – 0,06	3	0,2	0,082	$4^{cm3},1$	— 0,02

L'appareil spécial a été inventé qui aide beaucoup l'application de la méthode d'Eggertz à la détermination rapide du carbone dans les soufflages successifs d'acier Bessemer. L'échantillon de chaque soufflage serait envoyé au laboratoire en forme d'une barre plate

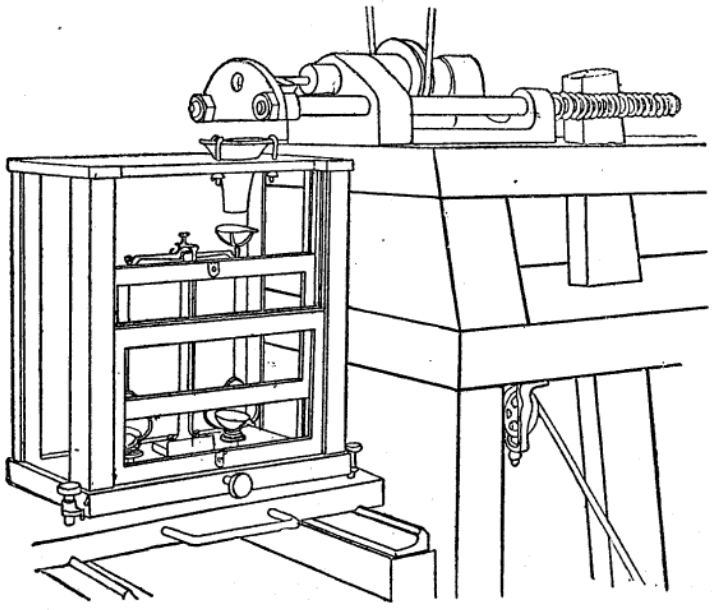


Fig. 4.

d'environ $22^{mm},2$ par $9^{mm},5$ par 204 millimètres de longueur. Ces barres seraient obtenues plus convenablement en passant le petit lingot à essai une série de petit cylindre forgeur. Dans certaines usines, le lingot à essai est forgé en barre. En chaque cas on permettrait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de laisser refroidir la barre lentement sur les briquettes réfractaires. Il ne faut pas toucher une surface froide métallique pendant le refroidissement.

La barre peut être très rapidement et convenablement forée et pesée dans une opération, par l'usage d'un foret à fer et une balance montrés en figure 4, et l'opérateur, à l'aide de l'appareil montré en figure 6, qui est placé près du foret et de la balance, peut ajouter graduellement une quantité de l'acide azotique jusqu'à 10 centimètres cubes aux copeaux d'un échantillon, pendant qu'il fore, pèse et passe à l'éprouvette le prochain échantillon pour analyse.

La dissolution des copeaux peut être précipitée en chauffant dans un bain de chlorure de calcium tenu à 110° C. par vapeur à haute pression, au lieu d'eau bouillante, et, quand ils sont dissous, la solution peut être rapidement refroidie en transportant les éprouvettes à un récipient en terre non lustré rempli d'eau, qui est conservé à froid par la vaporisation sur la surface extérieure. Le mélange de la dissolution dans le tube gradué comparatif est fortement facilité en courbant les parties supérieures des tubes à un angle d'environ 110°. Les meilleures comparaisons des couleurs se font dans une soi-disant « camera » ou chambre noire, et, quand les déterminations sont demandées pour la nuit et le jour, et les opérateurs changeant chaque semaine, il a été trouvé pratique de placer la camera dans une petite chambre noire et d'illuminer le verre aiguisé de la camera avec une lumière électrique incandescente dont les rayons jaunes ont été neutralisés par une feuille de papier de soie bleue.

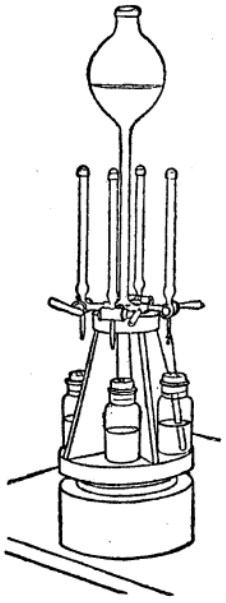


Fig. 5.

Au moyen de ces formes spéciales d'appareils, un opérateur, aidé par un garçon qui apporte les barres d'essai au laboratoire et rapporte les rapports à la fabrique, a régulièrement fait les rapports de 100 échantillons d'acier chaque demi-jour. L'acier variant de 0,08 % à 1,00 % de carbone, demande ainsi l'usage de plusieurs différents modèles d'acier. Une seule détermination est facilement faite en 12 minutes, avec les formes spéciales d'appareils susdits. Avec attention précise à toutes les précautions citées, la méthode d'Eggertz est juste jusqu'à 0,01 % en aciers au-dessous de 0,40 % de carbone, en deçà de 0,02 % en aciers de 0,40 à 0,80 % de carbone, et jusqu'à 0,03 % en aciers contenant de 0,80 à 1,2 % de carbone.

52. Détermination du manganèse. — Entre plusieurs méthodes en usage pour la détermination du manganèse dans l'acier, seulement deux seront brièvement remarquées :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a. La *méthode volumétrique de Williams*. Temps : 30 minutes. Justesse : 0,01 %.

b. La *méthode volumétrique de Deshayes*. Temps : 12 minutes. Justesse : 0,02 %.

a. Méthode volumétrique de Williams. — Cette méthode est fondée sur l'oxydation complète de manganèse à manganèse bioxyde, par l'addition de potassium chloraté à une dissolution de l'acier dans l'acide azotique concentré; la dissolution de ce bioxyde séparé dans un excès gradué de ferro-sulfate et la détermination de la quantité de ferro-sulfate pas oxydée par le manganèse bioxyde précipité, par le titrage avec une solution de potassium permanganaté.

Trois grammes de copeaux font une quantité convenable pour cette analyse. Les précautions nécessaires dans la dissolution de l'acier et dans la précipitation du bioxyde ont été fréquemment publiées. La filtration du bioxyde, qui est la première cause du délai, pourrait rapidement s'effectuer par l'usage d'un tube à entonnoir de 254 millimètres de haut, 25mm,4 de diamètre et d'une capacité de 100 centimètres cubes, et en plaçant une pièce circulaire de gaze de platine au fond du tube, sur laquelle est formé un filtre d'asbeste négligemment emballé. La filtration est hâtée par l'usage de la succion. Le gobelet, l'entonnoir et le précipité, sont lavés avec de l'eau froide et le contenu entier de l'entonnoir versé dans le gobelet, et un excès précisément mesuré de ferro-sulfate rapidement coulé de l'appareil montré à la figure 7. La dissolution du bioxyde est facilitée au moyen d'une baguette de verre, aplatie au bout; quand la dissolution est faite, le ferro-sulfate non oxydé est titré avec une dissolution normale de potassium permanganaté. En adoptant un volume constant de ferrous sulfate et par l'usage des tables, les calculs nécessaires pour déterminer la proportion de manganèse sont rapidement faits. Cette méthode est précise jusqu'à 0,01 %. Elle s'ajuste facilement à la détermination du manganèse dans dix ou vingt aciers à la fois. Une seule détermination occupe 30 minutes.

b. Méthode Deshayes. — Cette méthode est fondée sur l'oxydation du manganèse à l'acide permanganique, en ajoutant le bioxyde de plomb à une dissolution de l'acier en acide azotique; la séparation du bioxyde de plomb et la titration de l'acide permanganique dans le filtre, par le moyen de l'arsénite de soude.

Par une attention soigneuse aux détails, on peut compter sur l'oxydation complète de tout le manganèse, et en employant un appareil centrifuge pour séparer le bioxyde de plomb, au lieu du procédé ennuyeux de filtrer une poudre aussi fine à travers l'asbeste, une méthode a été développée par laquelle le manganèse est régulièrement rapporté sur les soufflages consécutifs de l'acier Bessemer, avant que les lingots soient laminés, un fait de grande valeur pratique en fabriquant l'acier d'un contenu garanti en manganèse aussi bien qu'en carbone. Cette méthode a été également trouvée de grande valeur pratique en fabriquant l'acier spécial Martin-Siemens comme la proportion résiduelle de manganèse au bain est un guide précieux dans la récarburation du métal.

L'appareil spécial au moyen duquel ces résultats peuvent être accomplis consiste en un foret et une balance pour le pesage rapide de l'échantillon montré à la figure 5; l'appareil illustré à la figure 6 pour l'addition rapide et exacte de l'acide azotique dont on se sert pour dissoudre l'échantillon; et un bain de chlorure de calcium, maintenu à une température de 140°-150° C. pour la dissolution rapide de l'échantillon et pour assurer l'oxydation complète du manganèse à l'acide permanganique, quand on ajoute le bioxyde de plomb. Aussi un appareil centrifuge, qui sépare complètement en 5 minutes le bioxyde de plomb, s'il fait 1200 révolutions par minute, et enfin, pour la dissolution de l'arsénite de soude, une burette exactement graduée et un réservoir de la forme montrée à la figure 7. La réaction finale en titrage est rendue plus distincte si le gobelet repose sur un plateau de verre aiguisé, formant le couvert d'une petite boîte contenant une lampe électrique incandescente [1].

1. La vitesse obtenue par l'usage d'un centrifuge empêche toute décomposition de l'acide permanganique, et écarte une source connue d'erreur dans cette méthode quand le bioxyde de plomb est ôté par le procédé lent de filtration.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La détermination est généralement exacte jusqu'à 0,02 % en acier au-dessous de 1,5 % de manganèse. Au moyen de l'appareil spécial susdit, une seule détermination peut être faite en 12 minutes, comprenant le drillage de la pièce d'acier pour analyse.

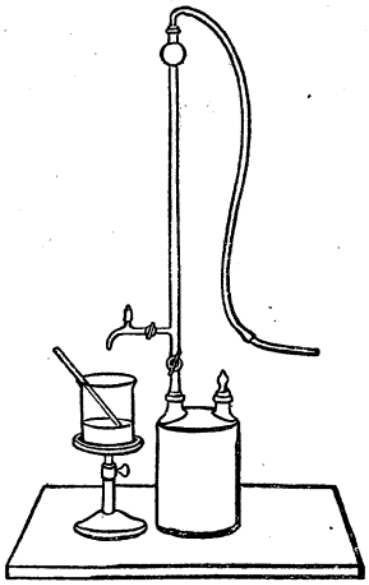


Fig. 6.

53. Détermination du silicium. — Pour la détermination du silicium dans l'acier, la méthode de Drown a été trouvée très satisfaisante; elle est exacte jusqu'à 0,005 %. Temps de l'opération, 30 minutes.

Cette méthode est fondée sur l'oxydation du silicium existant dans l'acier, à l'oxyde de silicium, et dans la déshydration complète et la séparation de ce corps par l'évaporation, aux vapeurs abondantes d'anhydride sulfurique, d'une solution de l'acier en acide azotique, auquel l'acide sulfurique a été ajouté.

La déshydration peut convenablement s'effectuer en ajoutant 75 centimètres cubes d'un mélange d'une portion d'acide azotique concentré, une portion d'acide sulfurique concentré et trois portions d'eau, à $4^{gr},7020$, des copeaux contenus dans une assiette couverte en porcelaine de $152^{mm},4$ de diamètre, de première qualité et bouillant rapidement sur un gros brûleur Bunsen à la sécheresse partiale, ou jusqu'à l'apparition de vapeurs copieuses d'anhydride sulfurique. L'oxyde de silicium se filtre plus rapidement si la masse refroidie est premièrement bien humectée avec l'acide chlorhydrique concentré (30^{cc}), bouillie un instant, et puis délayée avec l'eau chaude jusqu'à ce que la solution s'éclaircisse. D'autres détails ne sont pas nécessaires. Avec la masse facteur de copeaux prise pour l'analyse, le poids du précipité mis en ignition et multiplié par dix donne la proportion du silicium dans l'acier.

54. Détermination du phosphore. — Probablement les deux méthodes suivantes, avec des variations en détail, sont celles plus généralement usitées dans les laboratoires des usines d'acier américaines pour la détermination de phosphore en acier.

a. La *méthode de Drown-Emmerton.* Temps : 30 minutes. Justesse : 0,002 %.

b. La *méthode de Handy-Manby.* Temps : 10 minutes. Justesse : 0,003 %.

a. Méthode de Drown-Emmerton. — Cette méthode est fondée sur la conversion de tout le phosphore, dans une dissolution de l'acier en acide azotique, à l'acide orthophosphorique au moyen de potassium permanganaté; la réduction du bioxyde de manganèse, formé par une petite portion de sucre, et la précipitation du phosphore par le molybdate d'ammonium.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le précipité jaune peut être pesé ou, de préférence, dissous en ammonium hydroxyde, la dissolution acidulée avec l'acide sulfurique, et l'oxyde molybdique formant une proportion connue du précipité phospho-molybdique, réduit à l'oxyde molybdure en passant la dissolution à travers une colonne de zinc amalgamé, et puis on l'oxyde par une dissolution normale de potassium permanganaté. L'attention a été fréquemment appelée sur plusieurs petits détails de ce procédé, qui, par une longue expérimentation, a été trouvé nécessaire pour la justesse. Notablement, c'est une méthode dans laquelle le succès est seulement atteint par l'expérience.

La dissolution de l'acier et la précipitation du phosphore peuvent convenablement s'effectuer dans un flacon Erlenmeyer. Le phosphore est complètement précipité en 5 minutes par agitation. La succion est usée en filtration, des formes spéciales de réducteurs et de burettes pour la dissolution permanganatée ont été inventées, qui contribuent matériellement à la rapidité du procédé et à son adaptabilité à la détermination du phosphore en dix ou vingt échantillons d'acier à la fois. La méthode est juste jusqu'à 0,002 dans les aciers de 0,10 % de phosphore ou au-dessous. Une seule détermination peut être promptement finie en 30 minutes, quand on se sert de 4 grammes de copeaux pour l'analyse.

b. Méthode Handy-Manby. — 2 grammes sont pris généralement pour l'analyse quand on fait usage de cette méthode, et la dissolution et l'oxydation, aussi bien que le déplacement du manganèse bioxyde, sont effectuées comme dans la méthode Drown. Le précipité jaune est dissous dans le flacon Erlenmeyer, en lequel la dissolution d'acier était faite par l'addition d'un excès de la dissolution normale de sodium hydroxyde. La quantité d'alcali libre qui reste est déterminée par titration avec une dissolution normale d'acide azotique; on se sert de phénol-phtalein comme indicateur.

Comme on l'a déjà dit, une détermination de phosphore précise à 0,003 % peut être faite par cette méthode en 10 minutes; la méthode est alors particulièrement convenable si l'instruction est désirée au progrès de déphosphorisation pendant la fabrication de l'acier Martin-Siemens basique.

55. Détermination de l'arsenic. — Pour le travail ordinaire, cette détermination est rarement demandée, parce qu'il est maintenant généralement reconnu que l'arsenic n'exerce aucun effet délétère dans les quantités contenues dans les aciers de commerce, et, de plus, qu'il ne devrait pas être rangé avec le phosphore dans ses effets sur l'acier (voyez paragraphe 65, p. 149).

La meilleure méthode pour la détermination consiste à obtenir une dissolution d'acier en acide azotique et alors en acide sulfurique, et déplacement de tout l'excès de l'acide sulfurique, la distillation de l'arsenic comme chlorure par moyen de ferro-sulfate et de l'acide chlorhydrique; la précipitation de l'arsenic dans le distillé par l'acide sulfhydrique, et enfin pesant comme sulfide arsénieux, avec toutes les précautions ordinaires. 10 grammes de copeaux sont généralement pris pour l'analyse et la méthode occupe 12 heures. Elle est précise jusqu'à 0,003 %.

56. Détermination du soufre. — Deux méthodes pour la détermination du soufre dans l'acier seront brièvement remarquées :

a. La *méthode gravimétrique*. Temps : 6 heures. Justesse, 0,002 %.

b. La *méthode volumétrique*. Temps : 30 minutes. Justesse dépendant de la quantité de soufre et de carbone contenus, mais peut être donnée comme de 0,005 dans les meilleures conditions.

a. Méthode gravimétrique. — Le succès de cette méthode dépend en partie de l'oxydation complète du soufre pendant la dissolution des copeaux d'acier dans l'eau régale, et en partie de la neutralisation parfaite de la dissolution, avant l'addition de baryum chloride, pour assurer la précipitation complète de baryum sulfaté, exempte de baryum chloride emprisonné. Le manque d'espace empêche une description de cette méthode; pour être de valeur effective, il faudrait donner des détails de chaque phase de ce procédé analytique : si on prend 5^{gr},5024 de copeaux, le poids du précipité, divisé par 4 et mul-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tiplié par 10, donne la proportion de soufre. Une détermination est complète en 6 heures. Pour le travail ordinaire, sur un grand nombre d'échantillons, il est d'usage de les commencer dans l'après-midi et de filtrer et de peser les précipités le matin suivant.

b. Méthode volumétrique. — Toutes les méthodes pour la détermination du soufre dans l'acier, qui dépend du développement de l'acide sulfhydrique, sont sujettes à la critique qu'une portion du soufre échappe dans les gaz, probablement comme mercaptans. L'erreur due à cette cause n'est pas au-dessus de 0,005 % dans un acier de 0,040 % de soufre ou au-dessous, mais elle est beaucoup plus grande que ceci dans les aciers plus hauts en soufre; en outre, ce n'est pas une erreur constante, puisque elle varie avec le carbone aussi bien qu'avec le soufre dans l'acier.

La méthode d'après laquelle l'acide sulfhydrique est conduit dans une dissolution de chlorure de cadmium est peut-être la plus employée. Le sulfide de cadmium précipité, suspendu dans un grand volume d'eau, est dissous dans l'acide chlorhydrique, une dissolution de l'amidon coulée dedans, et la dissolution normale d'iode rapidement ajoutée d'une burette pour oxyder l'acide sulfhydrique libéré. La quantité ordinaire prise pour l'analyse est de 5 grammes; 1 centimètre cube de la dissolution de l'iode est égal à 0,01 % du soufre. Plusieurs formes convenables de l'appareil générateur ont été inventées par les chimistes qui emploient cette méthode. Le temps employé est de trente minutes.

57. Détermination du nickel. — La meilleure méthode pour la détermination du nickel et du cobalt dans l'acier consiste en la dissolution des copeaux dans l'acide chlorhydrique avec un peu d'acide azotique et en séparant les chlorures de nickel et de cobalt du chlorure ferrique au moyen d'éther, dans lequel réactif le chlorure ferrique est soluble. Après une séparation de ces deux dissolutions par la gravitation et le déplacement en bouillant une petite quantité d'éther associé avec le nickel et le cobalt, la petite quantité de fer qui reste est déplacée par deux précipitations avec l'excès de l'hydroxyde d'ammoniaque, et le nickel et le cobalt dans le filtre (avec le cuivre présent) est précipité par électrolyse en présence d'un excès de chlorure d'ammoniaque. Le cuivre est déterminé séparément sur une plus grande quantité d'échantillons, et la proportion déduite de celui du cobalt et du nickel.

En employant un courant direct pour l'illumination incandescente, le procédé est de beaucoup facilité par l'emploi d'un rhéostat, fabriqué de fil de résistance « tico », par lequel moyen le nombre d'ampères qu'on emploie peut être réglé selon le nombre des déterminations électrolytiques désirées. Un gramme de l'échantillon est pris pour la détermination du nickel et du cobalt. La méthode est précise jusqu'à 0,02 % et une seule détermination ne demande que deux heures.

58. Détermination du chrome. — La meilleure méthode pour la détermination du chrome dans l'acier consiste en l'oxydation du chrome à l'acide chromique par l'addition d'un excès de potassium permanganatè, à une dissolution de l'acier en acide sulfurique; le déplacement du manganèse bioxyde par filtration, la réduction de l'acide chromique par un excès d'une dissolution normale de ferro-sulfate, et une détermination de la quantité de ferro-sulfate non oxydé, par une dissolution normale de potassium permanganaté. On prend jusqu'à 3 grammes de copeaux pour l'analyse. La méthode occupe deux heures et est précise jusqu'à 0,02 %.

59. Détermination du cuivre. — Pour une détermination exacte de cuivre dans l'acier 10 grammes devraient être pris. Le cuivre est précipité comme sulfide cuivreux, par le sodium hyposulfite; filtré, mis en ignition à l'oxyde cuivrique, dissous dans les acides azotique et sulfurique, filtré, et le cuivre placé sur un petit cylindre de platine par un courant de trois ampères. La méthode demande six heures. Elle est précise jusqu'à 0,002 %.

60. Détermination du tungstène. — La méthode générale pour la détermination du tungstène dans l'acier consiste dans la séparation du tungstène comme oxyde par l'évaporation d'une dissolution d'acier en acide azotique (3 à 5 grammes); dissolvant le fer en acide chlorhydrique, filtrant, et dissolvant l'oxyde tungstique impur dans l'hydroxyde

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'ammoniaque concentré, filtrant et faisant évaporer dans une assiette de platine, et mettant en ignition, et pesant l'oxyde tungstique. Dans les aciers contenant 5,0 à 9,0 %, la méthode est précise jusqu'à 0,04 %. Le temps demandé est de douze heures.

61. Détermination de la scorie et des oxydes. — La méthode Eggertz est la plus brève et pratique pour la détermination des scories et des oxydes dans l'acier. Elle consiste à dissoudre les copeaux dans une dissolution aqueuse refroidie d'iode recristallisé ; l'agitation fréquente est nécessaire. En filtrant le résidu, il faut qu'il soit parfaitement lavé, finalement avec de l'eau chaude jusqu'à ce que l'iode et les sels de fer soient déplacés. Puis le papier à filtre est étendu sur un verre à pendule et le résidu transmis dans une assiette de platine par le lavage avec un courant fin d'hydroxyde de potassium, usant 50 centimètres cubes en tout. La dissolution est alors bouillie lentement pendant dix minutes, diluée et filtrée, et le résidu soigneusement et parfaitement lavé avec de l'eau, de l'acide chlorhydrique, et finalement avec de l'eau chaude. Après l'avoir mis en ignition soigneusement, le résidu est pesé et rapporté comme la scorie et les oxydes.

La méthode demande six heures. Dans les aciers tendres contenant 20 % de scorie et des oxydes, les duplicata toujours accordent jusqu'à 0,02 %. La méthode donne des résultats qui sont convenablement comparatifs dans les aciers de fonte soudable de carbone uniforme, mais c'est entièrement inapplicable pour les aciers à grande teneur en carbone, comme un carbure de fer insoluble dans l'iode et finalement mis en ignition dans l'oxyde de fer est rapporté comme oxyde.

La seule méthode par laquelle la quantité entière d'oxygène qui est dans l'acier pourrait être déterminée exactement est celle proposée par Ledebur, c'est-à-dire par l'ignition de l'échantillon dans un courant de chlore suivi par l'ignition dans un courant d'hydrogène[1].

XII. — Revue critique des spécifications étrangères pour rails d'acier

62. Introduction. — La statistique officielle suivante fait voir l'augmentation prononcée, exprimée en tonnes, des rails d'acier qu'on a exportés d'Amérique dans les dernières années.

	Tonnes métriques.
1894	12 425
1895	8 945
1896	73 667
1897	145 101
1898	295 711
1899	174 022

Les spécifications pour rails d'acier, publiées par les chemins de fer et les ingénieurs à l'étranger, intéressent donc d'une manière pratique les fabricants de rails américains. C'est pourquoi on a cru utile, après avoir fini la discussion des spécifications et des méthodes américaines d'essai des différentes espèces d'acier, de critiquer brièvement les spécifications étrangères pour rails. Les remarques doivent intéresser d'une manière pratique l'acheteur de rails à l'étranger, puisqu'elles indiquent de certaines conditions contenues dans leurs spécifications qui, à l'état actuel de la fabrication des rails, ne sont pas nécessaires. Le fabricant américain considère ces conditions comme de grands inconvénients, parce qu'elles augmentent le prix de fabrication et, par conséquent, le prix des rails sans améliorer d'aucune façon la qualité du produit.

1. *Stahl und Eisen*, vol. II (May, 1882), p. 193, etc. *Ding. Polytech. Jour.*, 245 (Aug. 1882), p. 295, abstracted in *Jour. Soc. Chem. Ind.*, vol. I (1882), pp. 566-67. *Jour. Iron and Steel Inst.*, n° 1 (1882), p. 585. *Jour. Chem. Soc.*, vol. XLIV (1883), pp. 121-22. *Trans. Amer. Inst. Min. Eng.*, vol. XXIV (1894), pp. 791-95. *Leitfaden für Eisenhütten-Laboratorien*, 1896, by A. Ledebur. *Stahl und Eisen*, vol. XIII (1893), p. 245, etc., P. Gladsky. *Stahl und Eisen*, vol. XIII (1893), p. 295, etc., A. Ledebur. *Stahl und Eisen*, vol. XIII (1893), pp. 1094-96, P. Gladsky. *Stahl und Eisen*, vol. XV (1895), pp. 580-81, A. Ledebur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

63. Procédés de fabrication spécifiés. — En examinant quarante et une spécifications étrangères pour rails on en a trouvé huit qui obligent le fabricant de se servir du « meilleur fer cru hématite anglais ou espagnol et de fer spéculaire (spiegeleisen) au charbon de bois ». Il est certain que les usines américaines ne peuvent pas satisfaire cette demande et, en l'état actuel de la fabrication, cette stipulation ne paraît nullement nécessaire, d'autant plus que, si on l'interprétait à la lettre, elle limiterait sérieusement la concurrence.

64. Propriétés chimiques spécifiées. — a. *Carbone.* — Dans 63 % des quarante et une spécifications étrangères qu'on a examinées, des limites en carbone sont spécifiées, et dans la plupart de ces cas une tolérance de teneur en carbone de 10/100 à 15/100 de 1 % est accordée. Cela s'accorde en général avec la pratique américaine, excepté que la spécification américaine augmente graduellement le carbone à mesure que le poids de section s'augmente; elle spécifie dans chaque cas une tolérance de 10/100 de 1 % (10 %).

On ne discutera pas les pourcentages actuels de carbone indiqués dans les spécifications étrangères. On se bornera à dire seulement qu'à cause du laminage rapide de rails, qui est à présent en usage en Amérique, et qui donne des températures de finissage plus élevées que celles réalisées dans les trains étrangers, l'ingénieur étranger peut augmenter en toute sûreté la proportion du carbone dans l'acier au delà de celle demandée dans la spécification, lorsque les rails sont fournis par les laminoirs américains. Il aura, moyennant cela, un rail qui s'use moins et dont la sûreté n'est aucunement diminuée.

Quelques laminoirs américains ont réussi dernièrement dans des expériences dont le but était le finissage des rails à une température plus basse que celle actuellement en usage, et cela sans diminuer la production actuelle. Sans doute donc cette amélioration sera adoptée avant peu et, dans ce cas, il ne sera pas nécessaire que les ingénieurs étrangers augmentent le carbone de leurs spécifications lorsqu'ils achèteront des rails dans les laminoirs américains.

Ce qui est désiré dans les rails pour assurer leur sûreté et des qualités contre l'usure, c'est la *structure* convenable; et, comme les pourcentages de carbone et d'autres éléments endurcissants qui produisent cette structure varient selon les températures de finissage, il faut que la composition chimique soit changée pour se conformer aux différentes conditions de fabrication. Enfin une composition normale internationale pour rails est tout à fait impraticable, et il est inutile qu'un pays ou un ingénieur déclarent que leur composition est la meilleure et que pour cela elle devrait être adoptée dans tous les pays[1].

b. *Phosphore et soufre.* — 32 % des spécifications qui ont été examinées exigent une teneur en phosphore et en soufre de 6/100 de 1 % (0,06 %) ou au-dessous. En Amérique, on fournira des rails qui remplissent ces stipulations, mais ils coûteront naturellement beaucoup plus cher que ne coûtent les rails de 10/100 de 1 % de phosphore, qui constituent de beaucoup la plus grande proportion de la production totale des laminoirs américains à rails. Bien des milliers de tonnes de rails américains qui contiennent 10/100 de 1 % (0,10 %) de phosphore ont rendu des services satisfaisants dans de rudes conditions. Dans les laminoirs américains, le prix des rails de 0,06 % ou de 0,08 % de phosphore, qui est plus élevé que celui des rails de 0,10 % de phosphore, ne procure pas, d'après l'avis de beaucoup de juges compétents en Amérique, un rail proportionnellement plus sûr ou meilleur.

c. *Silicium et manganèse.* — Il est fait mention de limites en silicium et en manganèse dans à peu près la moitié des spécifications étrangères pour rails qu'on a examinés. Le silicium spécifié varie de 0,06 % à 0,25 %. Le manganèse varie entre les limites généreuses de 0,40 % à 1,20 %. Les laminoirs américains ne seraient pas enclins à fournir des rails d'après une spécification qui limite le manganèse à 0,40 % qui est l'exigence d'une des spécifications examinées. La spécification normale américaine pour rails déclare que le silicium ne doit pas dépasser 0,20 % et accorde une tolérance de 0,30 % en manganèse; les limites varient de 0,70 % à 1,10 %, selon que la section de rail est agrandie.

1. Voir l'article de C.-P. Sandberg, *The danger of using too hard steel rails. Journal Iron and Steel Institute*, n° 2, 1898, pp. 76-110; spécialement p. 106.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut dire qu'en général l'adhérence stricte de la part d'un ingénieur étranger à une composition chimique complète qui aura été spécifiée, indépendamment des conditions changeantes de fabrication, et le rejet de grands lots de rails, *seulement* parce que l'échantillon qui est censé représenter le lot, dépasse sous quelque rapport la composition chimique spécifiée, obligent son client de payer plus qu'il ne faut pour avoir aujourd'hui des rails de première qualité, provenant des laminoirs américains.

65. Échantillon pour analyse. — Quelques spécifications étrangères exigent que chaque fusion d'acier à rails soit analysée pour le phosphore et l'arsenic, et elles stipulent que la fusion ne sera pas employée si le phosphore et l'arsenic dépassent 0,06 %. Il a été prouvé d'une manière concluante que l'arsenic ne doit pas être classé avec le phosphore pour ce qui regarde l'influence de celui-ci sur les qualités physiques de l'acier[1]. En outre, comme il n'existe pas de méthode rapide par laquelle le phosphore et *tout* l'arsenic peuvent être déterminés, les lingots de chaque fusion ne pourraient pas être mis de côté à cause de l'analyse, mais il faut qu'ils soient laminés en rails, et ensuite rejetés, si l'analyse montre plus de 0,06 % de phosphore et d'arsenic. Le fabricant américain ne veut pas prendre sur lui, sans une rémunération considérable, ce fardeau exigé par les analyses inutilement fréquentes qui sont demandées, et il s'ensuivra le plus souvent qu'il s'abstiendra de concourir, à moins que cette condition de la spécification ne soit éliminée.

Une autre clause très arbitraire, qui se trouve dans certaines spécifications étrangères, déclare que chaque lot de 508 tonnes de rails finis sera accepté ou rejeté selon l'analyse d'un fragment d'*un seul* rail, choisi par l'ingénieur; ladite analyse doit se faire aux dépens du contractant, par un chimiste indépendant choisi par l'ingénieur. Dans les laminoirs américains, les rails passent par plusieurs aires ou lits refroidissants, et sont forés dans beaucoup de séries de presses. Il serait donc impossible, sans beaucoup de travail additionnel, de mettre en tas de 508 tonnes, dans le dépôt, les rails des numéros consécutifs de fusion, en attendant qu'on eût l'analyse complète du chimiste indépendant qui se trouve à une grande distance. L'ingénieur, éclairé par tout ce qui a été publié et franchement avoué par le fabricant à l'égard des variations inévitables de la composition des différentes parties même d'une section de rail, abstraction faite de la variation des différents rails d'une fusion, comment peut-il consciencieusement accepter ou rejeter 508 tonnes de rails d'après l'analyse d'un seul rail?

66. Propriétés physiques spécifiées. — d. *Résistance de traction et allongement.* — Si une composition chimique est spécifiée, aussi bien qu'un essai au choc et, dans la plupart des cas, un essai à poids mort, il est inutile de demander un essai de traction et d'allongement. En effet, lorsque le carbone et d'autres éléments endurcissants sont spécifiés et strictement exigés, la résistance de traction et l'allongement ne devraient pas être matière de spécification. 54 % des 41 spécifications examinées exigent une détermination de la résistance de traction et de l'allongement, et dans 5 de ces 22 spécifications, la striction est aussi spécifiée; dans 3, un essai de flexion est aussi demandé. De ces 22 spécifications, 4, c'est-à-dire 34 % du nombre total examiné, spécifient et une composition chimique et un essai de traction. Les éprouvettes de traction ne représentent tout au plus qu'une petite partie de la section transversale du rail. Si on la prend dans le milieu de la tête, les résultats sont influencés par la ségrégation des éléments endurcissants, et ne représentent pas la partie du métal qui est soumise aux plus grands efforts dans le service; si on la prend dans cette partie, c'est-à-dire dans la surface extérieure, les résultats peuvent être influencés par la présence de quelques soufflures en partie soudées. Dans l'un ou l'autre cas, l'éprouvette ne peut donc pas être considérée comme représentant d'une manière complète le rail d'où elle aura été découpée, et beaucoup moins un lot de rails d'où l'échantillon aura été choisi.

e. *Essais au choc spécifiés.* — Toutes les spécifications étrangères qu'on a examinées contiennent un essai au choc; cependant, quelques-uns des essais au choc sont sujets à

1. F.-W. Harbord and A.-E. Tucker, *Journal Iron and Steel Institute*, n° 1, 1888, pp. 185-196, et n° 1, 1895, pp. 151-152 et 127-128.
J. E. Stead, *Journal Iron and Steel Institute*, n° 1, 1895, pp. 77-140.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de nombreuses critiques. Où une composition chimique est spécifiée et strictement suivie, l'essai au choc ne devrait pas demander une certaine flexion maximum, mais il devrait spécifier que le fragment de rail ne doit pas se casser par suite d'un seul coup appliqué sur la tête, le mouton devant tomber de hauteurs qui s'augmentent selon que le poids de la section de rail s'augmente. Dans le cas où l'ingénieur préfère que l'essai au choc comprenne une certaine flexion maximum, s'il spécifie que le fragment de rail à éprouver ne se cassera pas, il devra omettre le pourcentage de carbone dans les demandes chimiques. Toutes les deux méthodes assureront un rail dur et sûr, mais une tolérance de 0,10 % de carbone est peut-être un meilleur et plus prompt moyen d'assurer et de maintenir de l'uniformité dans le produit.

f. *Essais à poids mort spécifiés.* — Cet essai transversal, sous une charge statique, devrait embrasser une détermination de la limite élastique apparente, et au moyen de charges encore plus pesantes au delà de la limite élastique apparente, la détermination de la plus grande flexion permanente. On peut considérer cet essai comme étant inutile, lorsque la composition chimique est pleinement spécifiée et que la capacité des rails finis de supporter le choc est déterminée par l'essai au choc. Néanmoins les exigences des essais à poids mort, contenues dans les spécifications étrangères, sont satisfaites sans difficulté par les laminoirs américains. 70 % des 41 spécifications examinées spécifient un essai à poids mort, mais dans plusieurs on ne se sert que d'un poids qui ne produit pas une flexion permanente. L'essai est donc fréquemment considéré, dans les laminoirs américains, comme étant, pour le moins, peu nécessaire; car, lorsque les poids spécifiés sont en deçà de la limite d'élasticité proportionnelle de l'acier, les flexions ne sont que de purs facteurs de la section du rail.

67. Finissage. — Quelques spécifications étrangères exigent, même après que les échantillons ont été approuvés par l'ingénieur qui demeure à l'étranger, qu'une section de rail, longue de 304^{mm},8, soit soumise à l'ingénieur étranger et approuvée par écrit avant que le laminage puisse avoir lieu. Cela constitue un retard inutile, puisqu'on peut se fier en toute sûreté à l'adresse et à la probité des fabricants américains.

Dans bien des spécifications étrangères, les variations de hauteur de section qui sont permises sont trop petites, car elles ne tiennent pas compte de l'usure inévitable des cylindres. La régularité de la voie n'est compromise d'aucune façon par une tolérance de 0^{mm},397 au-dessous et de 0^{mm},79 au-dessus de la hauteur spécifiée; celles-ci sont les variations permises par les meilleurs chemins de fer américains. Quelques spécifications étrangères permettent une variation de longueur de rail, moindre que 6^{mm},35; c'est la pratique uniforme des chemins de fer américains de permettre une variation de longueur de 6^{mm},35.

La plupart des spécifications étrangères permettent, quant au poids, une variation de 1 % pour les rails séparés. On peut la réduire facilement à la moitié de 1 % pour toute la commande, mais on doit payer les rails d'après les poids actuels et pas d'après les poids théoriques.

68. Marque. — Sous ce rapport, les spécifications étrangères se conforment à la pratique américaine, car elles exigent, en général, que le nom du fabricant, le mois et l'année de fabrication, soient laminés lisiblement et en relief sur la tige de chaque rail, et que chaque rail soit marqué du numéro de la fusion dont il a été fabriqué.

69. Inspection. — Les aciéries américaines sont connues pour leur disposition à accorder à l'inspecteur toute facilité, pour qu'il puisse s'assurer que les rails sont fournis conformément aux spécifications. En échange, elles ont le droit de s'attendre, de la part de l'acheteur étranger, à une inspection qui ne retarde pas les opérations de manufacture. C'est une chose qui est loin d'être toujours réalisée, et, puisque c'est fréquemment une cause de retards coûteux et ennuyeux, il n'est pas hors de propos d'en faire mention.

Les inspecteurs qu'on envoie aux aciéries américaines ne se connaissent pas à l'inspection des rails, et pour cela ils sont trop stricts dans leurs inspections et trop lents à se décider. Encore lorsque les spécifications exigent que tous les quatre côtés de chaque rail

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soient examinés dans le but de trouver des soufflures, s'il en existe; que tous les trous soient mesurés; que chaque rail soit mesuré dans le sens de sa longueur et équarri à chaque extrémité, et marqué à quatre endroits distincts avec la marque de l'inspecteur; et qu'elles l'obligent, en outre, d'assister à chaque essai, de peser 1 % des rails et de surveiller le chargement des rails, pour s'assurer que seulement ceux qui portent sa marque sont expédiés, on a manifestement tort envers le fabricant de n'envoyer aux aciéries qu'un seul inspecteur et de demander que le fabricant fasse conformer sa production au nombre de rails qu'un inspecteur est capable d'examiner dans 9 ou 10 heures sur les 24. Souvent ce manque d'inspecteurs rend nécessaire un changement de cylindres dans les trains, et il a retardé le départ des vaisseaux qu'on chargeait. On doit décidément fournir assez d'inspecteurs pour qu'ils puissent examiner chaque jour toute la production journalière des laminoirs.

Quelques-unes des spécifications étrangères exigent que tous les rails rejetés soient entassés et gardés jusqu'à l'accomplissement du contrat, de sorte que, lorsqu'il voudra, l'inspecteur puisse les identifier à l'aide des numéros qu'il aura inscrits dans le livre. Cela est manifestement injuste pour le fabricant, puisque, avec un grand contrat pour des rails qui ne sont pas laminés sans interruptions, le fabricant serait empêché de vendre une quantité considérable de rails de deuxième qualité. Plusieurs spécifications étrangères déclarent que l'acceptation finale des rails et des plaques de jonction doit avoir lieu au port de déchargement. Cela n'est pas raisonnable; l'acceptation doit être basée sur les essais et l'inspection qui se font au lieu de la fabrication.

L'auteur est sûr que les acheteurs à l'étranger ne sont pas désireux de faire insérer, avec connaissance de cause, dans leurs spécifications des demandes qui, sans assurer un meilleur produit, ont pour résultat de restreindre la concurrence et d'augmenter le prix d'inspection aussi bien que le prix du produit. C'est cette pensée qui a inspiré cette critique des spécifications étrangères pour rails, et il est à espérer qu'il en résultera pour l'acheteur étranger et pour les laminoirs américains un avantage réciproque.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

APPENDICE

CAHIER DES CHARGES NORMALES AMÉRICAINES PROPOSÉES POUR ACIER ET FER FORGÉ

PIÈCES D'ACIER FONDUES

PROCÉDÉS DE FABRICATION

1. L'acier pour pièces fondues pourra être fabriqué par les procédés Martin-Siemens, à creuset, ou Bessemer. Les pièces fondues seront recuites ou non, selon que le contrat l'exige.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

2. **Pièces fondues ordinaires.** — Les pièces fondues ordinaires, celles pour lesquelles aucune épreuve physique n'est spécifiée, ne contiendront ni plus de 4/10 de 1 % (0,40 %) de carbone, ni plus de 8/100 de 1 % (0,08 %) de phosphore.

3. **Pièces fondues à soumettre aux épreuves.** — Les pièces fondues qui sont soumises à l'essai physique ne contiendront ni plus de 5/100 de 1 % (0,05 %) de phosphore, ni plus de 5/100 de 1 % (0,05 %) de soufre.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

4. **Essais de traction.** — Les pièces fondues à éprouver seront de trois classes : DURE, MOYENNE et DOUCE. Les minima des qualités physiques exigées dans chaque classe seront comme suit :

	Pièces fondues dures.	Pièces fondues moyennes.	Pièces fondues douces.
	—	—	—
Résistance de traction. . . . . kg par mm²	59,76	49,22	42,19
Limite élastique apparente. . . —	26,89	22,15	18,98
Allongement pour 100, sur 50mm,8	15	18	22
Striction, pour 100.	20	25	30

5. **Essais au choc.** — Un essai à outrance peut être substitué à l'essai de traction, lorsqu'il s'agit de pièces fondues de petites dimensions ou peu importantes, en choisissant trois pièces fondues dans un lot. Cet essai doit montrer le produit ductile et exempt de tout défaut préjudiciable et approprié aux emplois voulus. On composera un lot de toutes les pièces fondues provenant de la même fusion, recuites dans la même charge de fourneau.

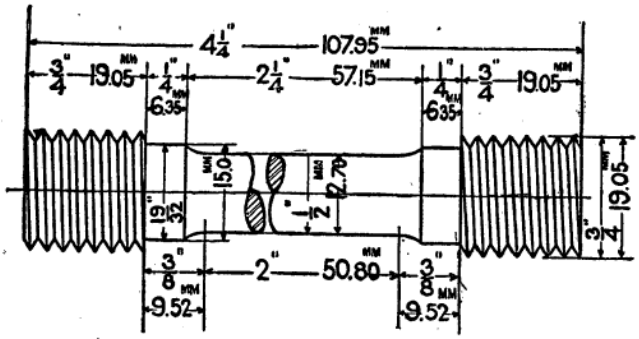
6. **Essai par la percussion.** — Les grandes pièces fondues devront être suspendues et martelées partout. Aucune gerçure, ni soufflure, ni défaut, ni faiblesse, ne devront apparaître après un tel traitement.

7. **Essai de flexion.** — Une éprouvette, grande de 25mm,4 sur 12m ,7, se courbera autour d'un diamètre de 25mm,4 sans fracture au côté saillant de la partie courbée, jusqu'à un angle de 120° pour les pièces fondues douces et de 90° pour les pièces fondues moyennes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ÉPROUVETTES ET CONDITIONS D'ESSAI

8. Éprouvette pour essai de traction. — L'éprouvette tournée, type normal, ayant un diamètre de $12^{mm},7$ et une longueur mesurée de $50^{mm},8$, doit être employée pour déterminer les propriétés physiques spécifiées au paragraphe n° 4. Elle est représentée dans le dessin ci-joint.



9. Nombre et provenance des éprouvettes pour essais de traction. — Le nombre des éprouvettes du type normal dépendra du genre et de l'importance des pièces fondues. L'éprouvette sera découpée à froid d'un témoin qui doit être moulé et fondu sur une portion d'une ou de plusieurs pièces fondues de chaque fusion, ou bien des masselottes (pourvu que celles-ci soient assez grandes pour être utilisées). Le témoin ou la masselotte devront subir le même traitement que la pièce fondue ou les pièces fondues avant que l'éprouvette soit découpée, et avant que le témoin ou la masselotte soient détachés de la pièce fondue.

10. Éprouvette pour essai de flexion. — Une éprouvette pour l'essai de flexion, grande de $25^{mm},4$ sur $12^{mm},7$, sera découpée à froid d'un témoin ou de la masselotte de la pièce fondue ou des pièces fondues, de la manière spécifiée au paragraphe n° 9. L'essai de flexion pourra se faire par la pression ou par des coups.

11. Limite élastique apparente. — La limite élastique apparente, spécifiée au paragraphe n° 4, sera déterminée par l'observation exacte de la chute du levier ou de l'arrêt dans le manomètre de la machine à essayer.

12. Échantillon pour analyse chimique. — La tournure provenant de l'éprouvette pour l'essai de traction, les copeaux provenant de l'éprouvette pour l'essai de flexion ou les copeaux provenant du petit lingot à essai, selon la préférence de l'inspecteur, seront employés pour déterminer si l'acier dépasse ou ne dépasse pas les limites, en fait de phosphore et de soufre, spécifiées aux paragraphes nos 2 et 3.

FINISSAGE

13. Les pièces fondues se conformeront aux dessins et seront exemptes de défauts, de soufflures et de gerçures par suite de la retraite. Les surfaces à usure seront solides et aucune porosité ne sera permise dans les portions où la résistance et la valeur de la pièce fondue, en ce qui regarde son utilité, seraient gravement affectées.

INSPECTION

14. Le fabricant accordera toutes les facilités convenables à l'inspecteur qui représente l'acheteur, pour que l'inspecteur puisse s'assurer que le produit fini est livré conformément au cahier des charges. Tous les essais et toutes les inspections s'effectueront au lieu de la fabrication et avant l'expédition.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ESSIEUX EN ACIER

PROCÉDÉ DE FABRICATION

1. L'acier pour essieux doit être fabriqué par le procédé Martin-Siemens.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

2. Il y aura trois classes d'essieux d'acier qui doivent se conformer, quant à leur composition chimique, aux limites suivantes :

	Essieux pour voitures, machines, trucks et tenders.	Essieux pour roues motrices (acier au carbone).	Essieux pour roues motrices (acier au nickel).
	—	—	—
	pour 100	pour 100	pour 100
Phosphore ne dépassera pas.	0,06	0,06	0,04
Soufre —	0,06	0,06	0,04
Nickel —	»	»	3,75

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

3. Essais de traction. — Pour les essieux de voitures, de trucks de machine et de trucks de tender, aucun essai de traction ne doit être requis.

4. Les minima des qualités physiques exigées pour les deux classes d'essieux pour roues motrices doivent être comme suit :

		Essieux pour roues motrices (acier au carbone).	Essieux pour roues motrices (acier au nickel).
		—	—
Résistance de traction	kg par mm²	56,25	56,25
Limite élastique apparente	—	28,12	35,15
Allongement pour 100, sur 50mm,8.		18	25
Striction pour 100.		»	45

5. Essais au choc. — Un essieu, choisi dans chaque fusion et essayé au choc, dont le procédé est décrit au paragraphe n° 9, doit résister au nombre de coups spécifié et de la hauteur spécifiée dans la table ci-dessous, sans cassure et sans qu'il dépasse, par l'effet du premier coup, la flexion indiquée. La fusion qui ne répondra pas à ces épreuves sera rejetée.

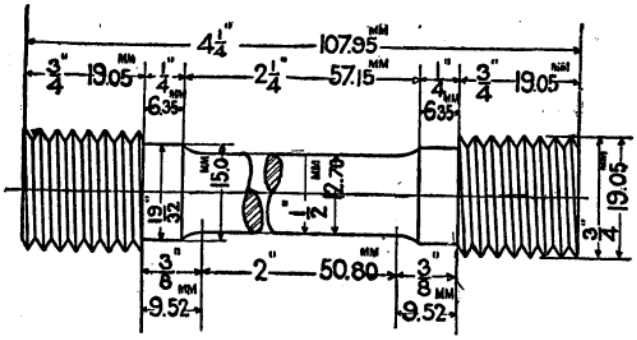
Diamètre de l'essieu au centre.	Nombre de coups.	Hauteur de la chute.	Flexion.
—	—	—	—
107mm,95	5	7m,315	209mm,55
111mm,12	5	7m,925	209mm,55
112mm,71	5	8m,687	209mm,55
117mm,47	5	9m,445	203mm,20
120mm,65	5	10m,363	203mm,20
136mm,52	5	13m,106	177mm,80
149mm,22	7	13m,106	139mm,70

6. Les essieux d'acier au carbone et d'acier au nickel pour roues motrices ne doivent pas être soumis à l'essai au choc indiqué ci-dessus.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ÉPROUVETTES ET CONDITIONS D'ESSAI

7. Éprouvette pour essais de traction. — L'éprouvette tournée, type normal, ayant un diamètre de $12^{mm},70$ et une longueur mesurée de $50^{mm},80$, doit être employée pour déterminer les propriétés physiques spécifiées au paragraphe n° 4. Elle est représentée dans le dessin ci-joint.



8. Nombre et provenance des éprouvettes pour essais de traction. — Une éprouvette longitudinale doit être découpée d'un essieu de chaque coulée. Le centre de cette éprouvette doit être à moitié distance du centre et de l'extérieur de l'essieu.

9. Description de l'essai au choc. — Les points d'appui sur lesquels repose l'essieu pendant les essais doivent être espacés de $0^{m},914$ de centre à centre; le mouton doit peser $743^{kg},889$, l'enclume qui repose sur des ressorts doit peser 7938 kilogrammes et elle doit pouvoir fonctionner verticalement; le nombre des ressorts sur lesquels elle repose doit être de douze, de l'espèce décrite dans le dessin. Le rayon des axes des points d'appui et de la face percutante du mouton dans le sens de l'axe de l'essieu doit être de 127 millimètres. Lorsqu'un essieu est éprouvé, il doit être placé dans la machine de manière que le mouton le frappe à moitié distance des bouts, il doit être renversé après les premier et troisième coups et, s'il est besoin, après le cinquième. Pour mesurer la flexion après le premier coup, il faut préparer un réglet qui soit aussi long que l'essieu, en le renforçant d'un côté et à chaque bout, d'une manière égale, de sorte que, lorsqu'il est posé sur l'essieu, les parties renforcées reposent sur les cols ou les bouts de l'essieu et que le reste du réglet ne touche l'essieu nulle part. Ensuite, il faut mettre l'essieu en place pour l'essai, poser le réglet dessus, et mesurer l'espace entre le réglet et l'essieu au point central de celui-ci; alors, après le premier coup, placer le réglet de la même façon qu'auparavant sur l'essieu, qui se trouve alors courbé, et mesurer l'espace entre le réglet et le côté de l'essieu qui est le plus près du réglet et au point qui est le plus éloigné de celui-ci. La différence entre les deux mesurages dénote la flexion.

10. Limite élastique apparente. — La limite élastique apparente spécifiée au paragraphe n° 4 sera déterminée par l'observation exacte de la chute du levier ou de l'arrêt dans le manomètre de la machine à essayer.

11. Échantillon pour l'analyse chimique. — La tournure provenant de l'éprouvette de traction pour les essieux à roues motrices, ou les copeaux pris à moitié distance entre le centre et l'extérieur des essieux pour voitures, machines et trucks de tender, ou les copeaux du petit lingot à essai, si l'inspecteur le préfère, seront employés pour déterminer si la fusion n'excède pas les limites de la composition chimique, spécifiées au paragraphe n° 2.

FINISSAGE

12. Les essieux doivent se conformer, en fait de grandeurs, de formes et de poids limi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tants, aux demandes spécifiées au contrat ou indiquées dans le dessin qui l'accompagne. Ils seront fabriqués et finis d'une manière conforme à l'usage des ouvriers et seront exempts de toute gerçure, couture ou soufflure, préjudiciables. En centrant, on doit se servir de centreurs de 60°. Il faut qu'ils aient du jeu aux points, pour éviter que les centres du tour ne s'émoussent.

MARQUE

13. Chaque essieu doit être marqué lisiblement du numéro de la coulée et des initiales du fabricant, aux endroits indiqués sur le dessin ou spécifiés par l'inspecteur.

INSPECTION

14. Le fabricant accordera toutes les facilités convenables à l'inspecteur qui représente l'acheteur, pour que l'inspecteur puisse s'assurer que le produit fini est livré conformément au cahier des charges. Tous les essais et toutes les inspections s'effectueront au lieu de la fabrication et avant l'expédition.

PIÈCES D'ACIER FORGÉES

PROCÉDÉS DE FABRICATION

1. L'acier pour pièces forgées sera fabriqué par les procédés Martin-Siemens, au creuset, ou Bessemer.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

2. Il y aura quatre classes de pièces d'acier forgées, qui se conformeront, quant à leur composition chimique, aux limites suivantes :

	Pièces forgées d'acier doux ou à petite teneur en carbone.	Pièces forgées d'acier au carbone non recuit.	Pièces forgées d'acier au carbone trempé à l'huile ou recuit.	Pièces forgées d'acier au nickel trempé à l'huile ou recuit.
	—	—	—	—
	pour 100	pour 100	pour 100	pour 100
Le Phosphore ne dépassera pas	0,10	0,06	0,04	0,04
Le Soufre —	0,10	0,06	0,04	0,04
Le Nickel —	»	»	»	3,75

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

3. Essais de traction. — Les minima des qualités physiques exigées dans les pièces forgées de grandeurs différentes de chaque classe seront comme suit :

TABLEAU.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Résistance de traction. — kg par mm carré	Limite élastique apparente. — kg par mm carré	Allongement. — pour 100 sur 50mm,8	Striction. — pour 100	
				Acier doux ou à petite teneur en carbone.
40,78	20,39	28	35	Pour pièces forgées solides ou en creux, aucun diamètre ni épaisseur de section ne devant dépasser 25cm,4.
				Acier au carbone non recuit.
52,73	26,37	18	30	Pour pièces forgées solides ou en creux, aucun diamètre ni épaisseur de section ne devant dépasser 25cm,4.
				Acier au carbone recuit.
56,25	28,12	22	35	Pour pièces forgées solides ou en creux, aucun diamètre ni épaisseur de section ne devant dépasser 25cm,4.
52,73	26,37	23	35	Pour pièces forgées solides aucun diamètre ne devant dépasser 50cm,8, ni épaisseur de section 38cm,1.
49,22	24,61	24	30	Pour pièces forgées solides de diamètre au-dessus de 50cm,8.
				Acier au carbone trempé à l'huile.
63,28	38,67	20	45	Pour pièces forgées solides ou en creux, aucun diamètre ni épaisseur de section ne devant dépasser 7cm,6.
59,76	35,15	22	45	Pour pièces forgées de sections rectangulaires ne dépassant pas 15cm,24 d'épaisseur, ou pour pièces forgées en creux dont les parois ne dépassent pas 15cm,24 d'épaisseur.
56,25	31,64	23	40	Pour pièces forgées solides de sections rectangulaires ne dépassant pas 25cm,4 d'épaisseur ou pour pièces forgées en creux dont les parois ne dépassent pas 25cm,4 d'épaisseur.
				Acier au nickel recuit.
56,25	35,15	25	45	Pour pièces forgées solides ou en creux, aucun diamètre ni épaisseur de section ne dépassant 25cm,4.
56,25	31,64	25	40	Pour pièces forgées solides aucun diamètre ne dépassant 50cm,8, ni épaisseur de section ne dépassant 38cm,1.
56,25	31,64	24	40	Pour pièces forgées solides de diamètre au-dessus de 50cm,8.
				Acier au nickel trempé à l'huile.
66,79	45,70	21	50	Pour pièces forgées solides ou en creux, aucun diamètre ni épaisseur de section ne devant dépasser 7cm,62.
63,28	42,19	22	50	Pour pièces forgées solides de sections rectangulaires ne dépassant pas 15cm,24 d'épaisseur, ou pour pièces forgées en creux dont les parois ne dépassent pas 15cm,24 d'épaisseur.
59,76	38,67	24	45	Pour pièces forgées solides de sections rectangulaires ne dépassant pas 25cm,4 d'épaisseur, ou pour pièces forgées en creux dont les parois ne dépassent pas 25cm,4 d'épaisseur.

4. Essai de flexion. — Une éprouvette de 25mm,4 sur 12mm,7 se courbera à froid à 180° sans fracture à l'extérieur de la partie courbée comme suit :

Autour d'un diamètre de 12mm,7 pour pièces forgées d'acier non trempé.

Autour d'un diamètre de 38mm,1 pour pièces forgées d'acier au carbone non recuit.

Autour d'un diamètre de 38mm,1 pour pièces forgées d'acier au carbone recuit, s'ils ont un diamètre de 50cm,8 ou au-dessus. Autour d'un diamètre de 25mm,4 pour pièces forgées d'acier au carbone recuit, s'ils ont un diamètre au-dessous de 50cm,8. Autour d'un diamètre de 25mm,4 pour pièces forgées d'acier au carbone trempé à l'huile.

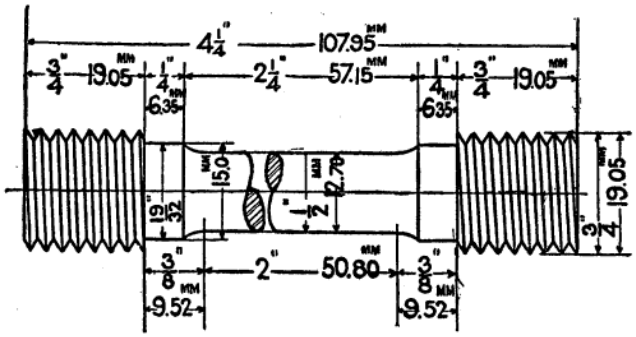
Autour d'un diamètre de 12mm,7 pour pièces forgées d'acier au nickel recuit.

Autour d'un diamètre de 25mm,4 pour pièces forgées d'acier au nickel trempé à l'huile.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ÉPROUVETTES ET CONDITIONS D'ESSAI

5. Éprouvette pour essai de traction. — L'éprouvette tournée, type normal, ayant un diamètre de 12mm,7 et une longueur mesurée de 50mm,8 doit être employée pour déterminer les propriétés physiques spécifiées au paragraphe n° 3. Elle est représentée dans le dessin ci-joint.



6. Nombre et provenance des éprouvettes pour essais de traction. — Le nombre des éprouvettes et la partie d'où elles seront tirées dans une fusion ou dans une pièce forgée dépendront du genre et de l'importance de la pièce forgée, et pour cela ils devront être réglés selon les cas. Les éprouvettes seront découpées à froid de la pièce forgée ou d'une prolongation ayant toute la grandeur de la pièce forgée, et elles seront parallèles à l'axe de la pièce forgée, et à moitié distance entre le centre et l'extérieur. Les éprouvettes seront longitudinales, c'est-à-dire que la longueur de l'éprouvette correspondra au sens dans lequel le métal est le plus étiré et travaillé. Lorsque les pièces forgées auront de grands bouts ou cols, les éprouvettes seront prises dans une prolongation du même diamètre que celui de la pièce forgée, derrière le grand bout ou col. Pour les arbres creux ou forgés, ou forés, l'éprouvette sera prise dans la section finie prolongée, à moitié distance entre les surfaces intérieure et extérieure des parois de la pièce forgée.

7. Éprouvette pour essai de flexion. — L'éprouvette pour l'essai de flexion, de 25mm,4 sur 12mm,7, sera découpée de la façon spécifiée au paragraphe n° 6. L'essai de flexion pourra se faire par la pression ou par des coups.

8. Limite élastique apparente. — La limite élastique apparente spécifiée au paragraphe n° 3 sera déterminée par l'observation exacte de la chute du levier ou de l'arrêt dans le manomètre de la machine à essayer.

9. Limite d'élasticité proportionnelle. — La limite d'élasticité proportionnelle spécifiée au paragraphe n° 5 sera déterminée au moyen d'un extensomètre qui sera attaché à l'éprouvette de façon à indiquer le changement dans la raison de l'extension sous une raison uniforme de chargement, et sera prise au point où la proportionnalité change.

10. Échantillon pour analyse chimique. — La tournure provenant de l'éprouvette pour l'essai de traction, ou les copeaux de l'éprouvette à courber, ou du petit lingot à essai, si l'inspecteur le préfère, seront employés pour déterminer si l'acier dépasse ou ne dépasse pas, quant à sa composition chimique, les limites spécifiées au paragraphe n° 2.

FINISSAGE

11. Les pièces forgées devront être exemptes de gerçures, de soufflures, de bavures et d'autres imperfections préjudiciables, et se conformeront aux dessins fournis par l'acheteur, et devront être fabriquées et finies d'une façon conforme à l'usage des ouvriers.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

INSPECTION

12. Le fabricant accordera toutes les facilités convenables à l'inspecteur qui représente l'acheteur, pour que l'inspecteur puisse s'assurer que le produit fini est livré conformément au cahier des charges. Tous les essais et toutes les inspections s'effectueront au lieu de la fabrication et avant l'expédition.

BANDAGES D'ACIER

PROCÉDÉS DE FABRICATION

1. L'acier pour bandages pourra être fabriqué par les procédés Martin-Siemens ou au creuset.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

2. Il y aura trois classes de bandages d'acier, qui seront conformes, quant à leur composition chimique, aux limites suivantes :

	Pour locomotives à voyageurs.	Pour locomotives à marchandises et pour fourgons.	Pour locomotives de manœuvre.
	—	—	—
	pour 100	pour 100	pour 100
Le Manganèse . . . . ne dépassera pas	0,80	0,80	0,80
Le Silicium ne sera pas au-dessous de	0,20	0,20	0,20
Le Phosphore . . . . ne dépassera pas	0,05	0,05	0,05
Le Soufre . . . . . —	0,05	0,05	0,05

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

3. Essais de traction. — Les minima des qualités physiques requises dans chacune des trois classes de bandages d'acier seront comme suit :

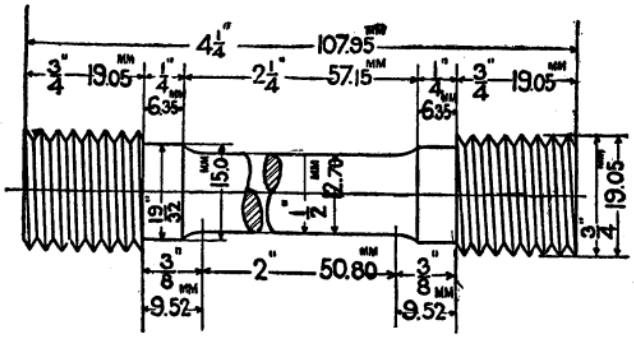
	Pour locomotives à voyageurs.	Pour locomotives à marchandises et pour fourgons.	Pour locomotives de manœuvre
	—	—	—
Résistance de traction . . . . kg par mm²	70,31	77,34	84,37
Allongement . . . . pour 100, sur 50mm,8	12	10	8

4. Essais au choc. — Dans le cas où le contrat exigerait un essai au choc, un bandage à épreuve de chaque fusion devra être fourni aux dépens de l'acheteur, pourvu que le bandage soutienne l'épreuve. Ce bandage à épreuve devra soutenir l'essai au choc décrit au paragraphe n° 7, sans cassure ni fêlure, et montrer un minimum de flexion égal à $D^2 \div (40T^2 + 2D)$. La lettre « D » dénote le diamètre intérieur et la lettre « T » l'épaisseur du bandage au milieu de la surface de roulement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ÉPROUVETTES ET CONDITIONS D'ESSAI

5. Éprouvette pour essai de traction. — L'éprouvette tournée, type normal, ayant un diamètre de 12mm,7 et une longueur mesurée de 50mm,8, doit être employée pour déterminer les propriétés physiques spécifiées au paragraphe n° 3. Elle est représentée dans le dessin ci-joint.



6. Provenance de l'éprouvette pour essai de traction. — Lorsque l'essai au choc est spécifié, l'éprouvette susdite sera découpée à froid du bandage éprouvé, à l'endroit le moins affecté par l'essai au choc. Si le diamètre du bandage est tel que toute la circonférence du bandage est gravement affectée par l'essai au choc, ou qu'aucun essai au choc ne soit exigé, l'éprouvette sera forgée d'un lingot fondu à cet effet lors de la fusion; ce lingot à essai sera soumis autant que possible à la même proportion de réduction que les lingots avec lesquels sont fabriqués les bandages.

7. Description de l'essai au choc. — Le bandage à essai sera placé au-dessous du pilon, en position verticale pour rouler, et sur une base solide du poids de 10 160 kilogrammes au moins, et il sera soumis à des coups successifs d'un mouton pesant 1016 kilogrammes qui tombe de hauteurs grandissantes jusqu'à ce que la flexion exigée soit réalisée.

8. Échantillon pour analyse chimique. — La tournure provenant de l'éprouvette à essai de traction, ou des copeaux du petit lingot à essai, ou ceux du bandage, si l'inspecteur le préfère, seront employés pour déterminer si la fusion n'excède pas les limites de la composition chimique, spécifiées au paragraphe n° 2.

FINISSAGE

9. Tous les bandages devront être exempts de gerçures, de soufflures, et de toute autre imperfection préjudiciable, et devront être conformes aux dimensions indiquées dans les dessins fournis par l'acheteur.

MARQUE

10. Les bandages seront marqués de la marque du fabricant et d'un numéro, de telle façon que chaque bandage puisse être identifié.

INSPECTION

11. Le fabricant accordera toutes les facilités convenables à l'inspecteur qui représente l'acheteur, pour que l'inspecteur puisse s'assurer que le produit fini est livré conformément au cahier des charges. Tous les essais et toutes les inspections s'effectueront au lieu de la fabrication et avant l'expédition.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

RAILS D'ACIER

PROCÉDÉS DE FABRICATION

1. *a*. L'acier sera fabriqué par les procédés Bessemer ou Martin-Siemens.

b. Tout le procédé de la fabrication et de l'essayage sera conforme à la meilleure méthode en usage, et on aura bien soin de se conformer aux instructions suivantes :

c. Les lingots devront être maintenus en position verticale dans les fours à lingots.

d. Aucun lingot saigné (creux) ne devra être employé.

e. On enlèvera suffisamment de matière de la partie supérieure pour que les rails soient sains.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

2. Les rails des poids différents en kilogrammes par mètre, et spécifiés ci-dessous, devront être conformes, quant à leur composition chimique, aux limites suivantes :

	24,802 à 29,266 + — pour 100	29,763 à 34,228 + — pour 100	34,723 à 39,188 + — pour 100	39,683 à 44,148 + — pour 100	44,645 à 49,605. — pour 100
Carbone	0,35 à 0,45	0,38 à 0,48	0,40 à 0,50	0,43 à 0,53	0,45 à 0,55
Phosphore ne dépassera pas	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Silicium —	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Manganèse	0,70 à 1,00	0,70 à 1,00	0,75 à 1,05	0,80 à 1,10	0,80 à 1,10

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

3. Un seul essai au choc sera fait sur un fragment de rail n'excédant pas 1m,83 de long, choisi dans cinq fusions d'acier. Le rail sera placé, la tête en haut, sur les supports, et ses différentes sections seront soumises aux essais de chocs suivants :

Poids de rail. — kg par mètre	Hauteur de la chute. — mètres
De 22.322 à 27.282	4.572
27.283 à 32.242	4.877
32.243 à 37.204	5.182
37.205 à 42.164	5.485
42.165 à 49.605	5.791

Si un rail soumis à l'essai au choc se rompt, deux essais de plus seront faits avec d'autres rails de la même fusion d'acier, et si l'un ou l'autre de ces derniers ne réussit pas, tous les rails de la fusion qu'ils représentent seront rejetés; mais si ces deux fragments supplémentaires supportent l'épreuve, tous les rails de la fusion qu'ils représentent seront acceptés. Si les rails provenant de la fusion éprouvée sont rejetés, faute de remplir les conditions de l'essai au choc, ci-dessus spécifiées, deux autres rails seront soumis aux mêmes essais, l'un de la fusion qui précède immédiatement celle-là et l'autre de celle qui la suit immédiatement. Dans le cas où le premier essai de la fusion précédente ou de celle qui suit ne réussirait pas, deux essais supplémentaires seront faits avec la même fusion d'acier, dont l'acceptation ou le rejet sera déterminé d'après les spécifications ci-dessus; et si les rails de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fusion précédente ou de la suivante sont rejetés, des essais semblables pourront être faits avec les fusions précédentes ou celles suivantes, selon les cas, jusqu'à ce que tout le groupe de cinq fusions soit essayé, s'il est nécessaire.

L'acceptation ou le rejet de tous les rails de n'importe quelle fusion dépendront du résultat des essais auxquels ils seront soumis.

ÉPROUVETTES ET CONDITIONS D'ESSAI

4. Machines pour essais au choc. — La machine pour les essais au choc devra être pourvue d'un mouton pesant 908 kilogrammes, dont la face percutante aura un rayon ne dépassant pas 127 millimètres, et le rail à essai sera placé, la tête en haut, sur des supports solides espacés de $0^{m},914$. L'enclume devra peser au moins 9 tonnes 072, et les supports feront partie de l'enclume ou y seront fermement attachés.

5. Échantillon pour analyse chimique. — Le fabricant devra fournir chaque jour à l'inspecteur les déterminations en carbone de chaque fusion, et une analyse chimique complète toutes les 24 heures. Cette analyse représentera la moyenne des autres éléments contenus dans l'acier. Ces analyses se feront avec des forures prises dans un petit lingot à essai.

FINISSAGE

6. Section. — A moins d'autres spécifications, la section de rail sera du type normal américain, qui est recommandé par la Société américaine des Ingénieurs civils, et se conformera aussi exactement que possible au modèle que la compagnie des chemins de fer doit fournir, conformément au paragraphe n° 7, par rapport au poids spécifié. Quant à la hauteur du rail, une variation de $0^{mm},397$ de moins et de $0^{mm},79$ de plus que la hauteur spécifiée sera permise. Néanmoins, un parfait ajustement des plaques à jonction sera toujours maintenu.

7. Poids. — Après avoir suivi les instructions du paragraphe n° 6, on maintiendra le poids des rails, autant que possible, égal à celui qui est spécifié dans le contrat. Une variation de la moitié de 1 % dans une commande entière sera permise. Les rails seront acceptés et payés selon les poids actuels.

8. Longueur. — La longueur normale des rails sera de $9^{m},144$. Des longueurs moins grandes, variant par $0^{m},305$ jusqu'à $7^{m},315$, seront acceptées dans la proportion de 10 % de toute la commande. Une variation de $6^{mm},35$ de la longueur spécifiée sera permise.

9. Forage. — Des trous circulaires pour les plaques à jonction seront percés conformément aux spécifications de l'acheteur. Les trous seront conformes de tout point aux dimensions et au dessin fournis, et devront être exempts de barbes.

10. Finissage. — Les rails seront dressés à froid, auront la tête lisse, seront sciés à angle droit aux extrémités; et, avant leur expédition, la barbe occasionnée par la scie sera enlevée, et les extrémités seront nettoyées. Les rails de première qualité (n° 1) devront être exempts de toute soufflure et de tout défaut préjudiciables.

MARQUE

11. Le nom du fabricant, le mois et l'année de fabrication seront imprimés lors du laminage en lettres saillantes sur le côté de la tige, et le numéro de la fusion sera marqué sur chaque rail.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

INSPECTION

12. Le fabricant accordera toutes les facilités convenables à l'inspecteur qui représente l'acheteur, pour que l'inspecteur puisse s'assurer que le produit fini est livré conformément au cahier des charges. Tous les essais et toutes les inspections s'effectueront au lieu de la fabrication et avant l'expédition.

RAILS DE DEUXIÈME QUALITÉ (n° 2)

13. Les rails qui ont des défauts physiques préjudiciables, ou qui, pour quelque autre cause, ne peuvent pas passer pour des rails de première qualité (n° 1) seront considérés comme de deuxième (n° 2), pourvu, cependant, que les rails qui ont des imperfections qui diminuent sérieusement leur résistance soient rejetés. Les bouts de tous les rails de deuxième qualité seront peints pour les distinguer.

ACIER POUR PLAQUES DE JONCTION

PROCÉDÉS DE FABRICATION

1. L'acier pour plaques de jonction pourra être fabriqué par les procédés Bessemer ou Martin-Siemens.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

2. L'acier pour plaques de jonction doit se conformer, quant à sa composition chimique, aux limites suivantes :

		pour 100
Carbone	ne dépassera pas	0,15
Phosphore	—	0,10
Manganèse		0,30 à 0,40

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

3. Essais de traction. — L'acier pour plaques de jonction doit se conformer aux qualités physiques suivantes :

Résistance de traction	kg par mm²	37,97 à 45,00
Limite élastique apparente	—	22,50
Allongement pour 100, sur 203mm,2 ne sera pas moins de		25

4. *a.* **Essais de flexion.** — Une éprouvette découpée de la tête de la plaque de jonction doit se courber à 180° à plat sur elle-même sans fracture au côté extérieur de la partie courbée.

b. Les essais de flexion se feront, si on le préfère, avec une plaque de jonction non poinçonnée, qui sera élargie d'abord, s'il est nécessaire, et ensuite courbée à 180° à plat, de sorte que les deux faces se touchent, sans fracture au côté extérieur de la partie courbée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ÉPROUVETTES ET CONDITIONS D'ESSAI

5. Éprouvette pour essai de traction. — Une éprouvette d'une longueur mesurée de $203^{mm},2$, découpée de la tête de la plaque de jonction, sera employée pour déterminer les propriétés physiques spécifiées au paragraphe n° 3.

6. Nombre d'essais de traction. — Une éprouvette pour l'essai de traction sera prise dans des plaques de jonction laminées de chaque fusion, mais au cas où cette éprouvette révélerait des soufflures ou se romprait en dehors de la troisième partie, celle du milieu, de sa longueur mesurée, il sera permis de la négliger et d'en substituer une autre.

7. Éprouvettes pour essai de flexion. — Une éprouvette découpée de la tête de la plaque de jonction sera prise dans une plaque laminée de chaque fusion, ou, si on le préfère, l'essai de flexion se fera avec une plaque de jonction non poinçonnée, qui, s'il est nécessaire, sera élargie avant l'essai. L'essai de flexion pourra se faire par la pression ou par des coups.

8. Limite élastique apparente. — Pour les fins de ce cahier des charges, la limite élastique apparente sera déterminée par l'observation exacte de la chute du levier ou de l'arrêt dans le manomètre de la machine à essayer.

9. Échantillon pour analyse chimique. — Pour déterminer si le produit se conforme aux limitations chimiques prescrites au paragraphe n° 2 (voir plus haut), l'analyse se fera avec des forures prises dans un petit lingot à essai.

FINISSAGE

10. Toutes les plaques de jonction doivent être laminées d'une manière lisse et être conformes au modèle. Les plaques seront cisaillées exactement à l'égard de la longueur, seront exemptes de barbes et de gerçures et iront parfaitement aux rails pour lesquels elles sont destinées. Le perçage et l'entaillage se conformeront sous tous les rapports au dessin et aux dimensions fournis.

MARQUE

11. Le nom du fabricant et l'année de fabrication seront laminés en caractères saillants sur le côté de la plaque de jonction.

INSPECTION

12. Le fabricant accordera toutes les facilités convenables à l'inspecteur qui représente l'acheteur, pour que l'inspecteur puisse s'assurer que le produit fini est livré conformément au cahier des charges. Tous les essais et toutes les inspections s'effectueront au lieu de la fabrication et avant l'expédition.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ACIER POUR LA CONSTRUCTION DES ÉDIFICES

PROCÉDÉS DE FABRICATION

1. L'acier pourra être fabriqué par les procédés Martin-Siemens ou Bessemer.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

2. Ni l'une ni l'autre des deux classes d'acier pour la construction des édifices ne devront contenir plus du dixième de 1 % de phosphore.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

3. Classes. — Il y aura deux classes d'acier pour la construction des édifices, à savoir, *acier à rivets* et *acier moyen*, qui se conformeront aux qualités physiques suivantes :

4. Essai de traction.

		Acier à rivets.	Acier moyen.
Résistance de traction.	kg par mm²	35,15 à 42,19	42,19 à 49,22
Limite élastique apparente.	—	21,09	24,61
Allongement pour 100, sur 203mm,2 ne sera pas au-dessous de		26,00	22,00

5. Modifications en allongement pour le produit mince et épais. — Pour le produit ayant une épaisseur de moins de 7mm,94 ou de plus de 1mm,91, les modifications suivantes seront faites dans les demandes d'allongement.

a. Pour chaque augmentation de 3mm,17 d'épais au-dessus d'une épaisseur de 1mm,91, une réduction de 1 % sera faite sur l'allongement spécifié.

b. Pour chaque diminution de 1mm,59 d'épais au-dessous de 7mm,94, une réduction de 2 1/2 % sera faite sur l'allongement spécifié.

c. Pour les boulons, l'allongement à exiger sera de 5 % de moins que celui qui est spécifié au paragraphe n° 4, comme déterminé à l'aide d'une éprouvette dont le centre sera à 25mm,40 de la surface.

6. Essais de flexion. — Les deux classes d'acier pour la construction des édifices devront se conformer aux essais de flexion suivants : et à ce propos, l'éprouvette sera large de 38mm,1, si possible; et pour tout produit épais de 19mm,1 ou au-dessous l'éprouvette sera de la même épaisseur que celle du produit fini d'où elle est découpée, mais pour le produit épais de plus de 19mm,1, l'éprouvette à courber pourra avoir 12mm,7 d'épaisseur. Les ronds pour rivets seront essayés ayant toute la grandeur d'étirage.

d. L'acier à rivets devra se courber à froid à 180°, à plat sur lui-même sans fracture à l'extérieur de la partie courbée.

e. L'acier moyen devra se courber à froid à 180°, autour d'un diamètre égal à l'épaisseur de l'éprouvette sans fracture à l'extérieur de la partie courbée.

ÉPROUVETTES ET CONDITIONS D'ESSAI

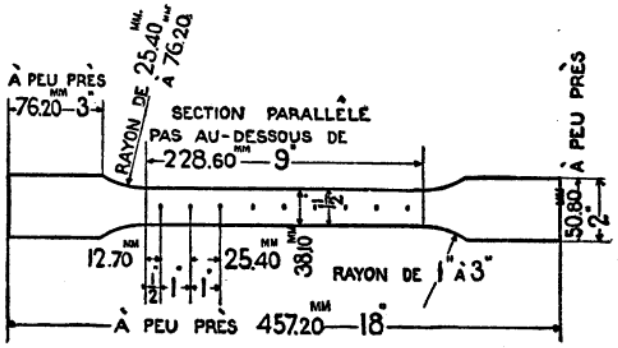
7. Éprouvette pour essai de traction. — L'éprouvette normale d'une longueur mesurée de 203mm,2 sera employée pour déterminer les propriétés physiques spécifiées aux para-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

graphes nos 4 et 5. La forme normale de l'éprouvette pour plaques cisaillées sera conforme au dessin ci-dessous.

Pour d'autres produits l'éprouvette sera pareille à celle pour plaques cisaillées, ou elle sera parée ou tournée, parallèle dans toute sa longueur; et dans tous les cas où il sera possible, deux côtés opposés de l'éprouvette seront les surfaces laminées. Les ronds à rivets et les petites barres laminées seront essayés en gardant leur grandeur d'étirage.

8. Nombre d'essais de traction. — Une éprouvette pour essai de traction devra être prise dans le produit fini de chaque fusion, mais au cas où elle révèlerait des soufflures ou se romprait en dehors de la troisième partie, celle du milieu, de sa longueur mesurée, il sera permis de la rejeter et d'en substituer une autre.



9. Éprouvettes à courber. — Une éprouvette à courber sera tirée du produit fini de chaque fusion à l'état dans lequel il sort des laminoirs, et pour le produit épais de 19mm,05 ou au-dessous, cette éprouvette gardera la surface naturelle laminée des deux côtés opposés. L'éprouvette à courber sera large de 38mm,10, si possible; et pour le produit épais de 19mm,05 l'éprouvette à courber aura 12mm,7 d'épaisseur.

f. L'essai de flexion pourra se faire par la pression ou par des coups.

10. Éprouvettes recuites. — Le produit destiné à être employé sans recuisson ni autre traitement sera essayé, par l'essai de traction, à l'état où il se trouve en sortant des laminoirs. Pour le produit destiné à être recuit ou traité autrement avant d'être employé, une section, grandeur naturelle, de la longueur de l'éprouvette employée dans l'essai de traction, sera traitée de la même façon avant que l'éprouvette à essai de traction en soit découpée.

11. Limite élastique apparente. — Pour les fins de ce cahier des charges, la limite élastique apparente sera déterminée par l'observation exacte de la chute du levier ou de l'arrêt dans le manomètre de la machine à essayer.

12. Échantillon pour analyse chimique. — Afin de déterminer si le produit se conforme aux limitations chimiques prescrites au paragraphe n° 2 (voir plus haut), l'analyse sera faite avec des forures provenant d'un petit lingot à essai.

VARIATION DE POIDS

13. Si la section transversale ou le poids varient de plus de 2 1/2 % de ceux qui sont spécifiés, ce sera une cause suffisante pour que le produit soit rejeté, à l'exception cependant des plaques cisaillées, pour lesquelles les variations suivantes sont permises.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

g. Les plaques de 61^{kg}, 03 par mètre carré ou au-dessus, quand elles sont commandées au poids, ne varieront en moyenne ni de plus de 2 1/2 % au-dessus, ni de plus de 2 1/2 % au-dessous du poids théorique.

h. Les plaques de moins de 61^{kg},03 par mètre carré, quand elles sont commandées au poids, ne varieront pas en moyenne plus que comme suit :

Jusqu'à 1^{m},91 de large, de 2 1/2 % au-dessus ou de 2 1/2 % au-dessous du poids théorique.

1^{m},91 de large et au-dessus, de 5 % au-dessus ou de 5 % au-dessous du poids théorique.

i. Pour toutes les plaques commandées à l'épaisseur, il sera permis un excédent moyen de poids au-dessus de celui qui correspond aux dimensions indiquées dans la commande et qui égale celui qui est spécifié dans la table suivante :

TABLE DES TOLÉRANCES COMME EXCÉDENT EN PLAQUES RECTANGULAIRES COMMANDÉES A L'ÉPAISSEUR

(Le poids de 16^{cm3},38 d'acier laminé est censé être de 0^{kg},128502.)

Plaques épaisses de 6^{mm},35 et au-dessus.

Epaisseur de plaque.	LARGEUR DE PLAQUE. Jusqu'à 1^{m},91.	1^{m},91 à 2^{m},54	Au-dessus de 2^{m},54
mm.	pour 100	pour 100	pour 100
6,35	10	14	18
7,94	8	12	16
9,52	7	10	13
11,11	6	8	10
12,70	5	7	9
14,29	4 1/2	6 1/2	8 1/2
15,87	4	6	8
Au-dessus de 15,87	3 1/2	5	6 1/2

Plaques épaisses de moins de 6^{mm},35.

Épaisseur de plaque.	LARGEUR DE PLAQUE. Jusqu'à 1^{m},27.	1^{m},27 et au-dessus.
mm.	pour 100	pour 100
3,17 à 3,97	10	15
3,97 à 4,76	8 1/2	12
4,76 à 6,35	7	10

FINISSAGE

14. Le produit fini doit être exempt de bavures, de soufflures et de gerçures préjudiciables, et sera fini d'une manière conforme à l'usage des ouvriers.

MARQUE

15. Toute pièce d'acier finie sera marquée du numéro de la fusion; mais les petites pièces pourront être expédiées en faisceaux fermement liés ensemble avec du fil de fer, ayant une étiquette en métal où le numéro de la fusion sera marqué.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

INSPECTION

16. Le fabricant accordera toutes les facilités convenables à l'inspecteur qui représente l'acheteur, pour que l'inspecteur puisse s'assurer que le produit fini est livré conformément au cahier des charges. Tous les essais et toutes les inspections s'effectueront au lieu de la fabrication et avant l'expédition.

ACIER POUR CONSTRUCTION DE PONTS ET NAVIRES

PROCÉDÉ DE FABRICATION

1. L'acier sera fabriqué par le procédé Martin-Siemens.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

2. Chacune des trois classes d'acier pour construction de ponts et navires doit se conformer, quant à sa composition chimique, aux limites suivantes :

		Acier fabriqué par le procédé acide.	Acier fabriqué par le procédé basique.
		pour 100	pour 100
Le Phosphore	ne dépassera pas	0,08	0,06
Le Soufre	—	0,06	0,06

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

3. Classes. — Il y aura trois classes d'acier pour construction de ponts et navires, à savoir, acier à rivets, acier doux, et acier moyen, qui devront se conformer aux qualités physiques suivantes :

4. Essais de traction.

	Acier à rivets.	Acier doux.	Acier moyen.
Résistance de traction, kg par mm²	35,15 à 42,19	36,56 à 43,59	42,19 à 49,22
Limite élastique apparente —	21,09	22,50	24,61
Allongement pour 100, sur 203mm,2 ne sera pas au-dessous de. . . .	26	25	22

5. Modifications dans l'allongement pour produits mince et épais. — Pour le produit ayant une épaisseur de moins de 7mm,94 et de plus de 19mm,05 les modifications suivantes seront faites dans les demandes d'allongement.

a. Pour chaque augmentation de 3mm,17 d'épais au-dessus d'une épaisseur de 19mm,05, une réduction de 1 % sera faite sur l'allongement spécifié.

b. Pour chaque diminution de 1mm,59 d'épais au-dessous de 7mm,94, une réduction de 2 1/2 % sera faite sur l'allongement spécifié.

c. Pour boulons faits de n'importe laquelle des trois classes d'acier, l'allongement demandé sera de 5 % de moins que celui qui est spécifié au paragraphe n° 4, comme déterminé à l'aide d'une éprouvette dont le centre sera à 25mm,4 de la surface.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

6. Essais de traction pour barres à œillet. — Les barres à œillet doivent être d'acier moyen. Les essais de traction pour barres à œillet de grandeur naturelle doivent présenter un allongement de 12 1/2 % sur 4m,57 et la résistance à la traction ne doit pas être moins de 38kg,67 par millimètre carré. Il faut que les barres à œillet se rompent au corps, mais si une barre à œillet se rompt à la tête, et si elle montre un allongement de 12 1/2 % sur 4m,57, et la résistance de traction conforme aux spécifications, ce ne sera pas cause que les barres soient rejetées, pourvu que pas plus du tiers de la totalité des barres à œillet ne se rompe à la tête.

7. Essais de flexion. — Les trois classes d'acier pour construction de ponts et navires devront se conformer aux essais de flexion suivants; mais à ce propos l'éprouvette sera large de 38mm,1, si possible, et pour tout produit épais de 19mm,05 ou au-dessous, l'éprouvette sera de la même épaisseur que celle du produit fini d'où elle est découpée, mais pour le produit épais de plus de 19mm,05 l'éprouvette à courber pourra être épaisse de 12mm,7. Les ronds à rivets seront essayés, ayant la grandeur naturelle d'étirage.

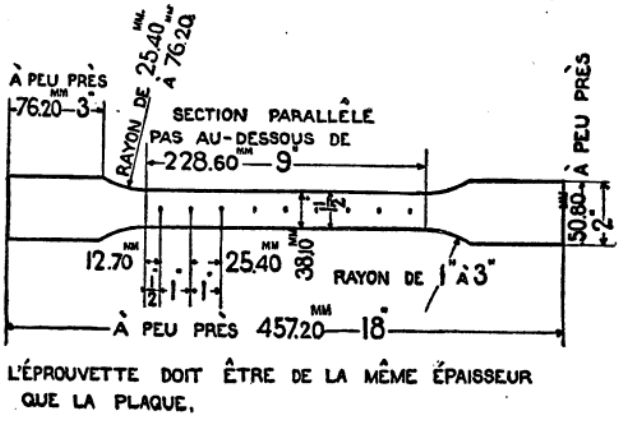
d. L'acier à rivets doit se courber à froid à 180° à plat sur lui-même, sans fracture à l'extérieur de la partie courbée.

e. L'acier doux doit se courber à froid à 180° à plat sur lui-même, sans fracture à l'extérieur de la partie courbée.

f. L'acier moyen doit se courber à froid à 180° autour d'un diamètre égal à l'épaisseur de l'éprouvette, sans fracture à l'extérieur de la partie courbée.

ÉPROUVETTES ET CONDITIONS D'ESSAI

8. Éprouvettes pour essais de traction. — L'éprouvette normale d'une longueur mesurée de 203mm,2 doit être employée pour déterminer les propriétés physiques spécifiées aux paragraphes nos 4 et 5. La forme normale de l'éprouvette pour plaques cisaillées sera conforme au dessin ci-dessous.



Pour d'autres produits l'éprouvette sera pareille à celle pour plaques cisaillées, ou elle sera parée ou tournée, parallèle dans toute sa longueur; et, dans tous les cas où il sera possible, deux côtés opposés de l'éprouvette seront les surfaces laminées. Les ronds à rivets et les petites barres laminées seront essayés en gardant leur grandeur d'étirage.

9. Nombre d'essais de traction. — Une éprouvette pour essai de traction doit être prise dans le produit fini de chaque fusion, mais au cas où elle révélerait des soufflures ou se romprait en dehors de la troisième partie, celle du milieu, de sa longueur mesurée, il sera permis de la rejeter et d'en substituer une autre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

10. Éprouvettes à courber. — Une éprouvette à courber sera tirée du produit fini de chaque fusion à l'état dans lequel il sort des laminoirs, et pour le produit épais de 19^{mm},05 ou au-dessous, cette éprouvette gardera la surface naturelle laminée des deux côtés opposés. L'éprouvette à courber sera large de 38^{mm},1 si possible, et pour le produit épais de plus de 19^{mm},05, l'éprouvette à courber aura 12^{mm},7 d'épaisseur.

g. L'essai de flexion pourra se faire par la pression ou par des coups.

11. Éprouvettes recuites. — Le produit destiné à être employé sans recuisson ni autre traitement sera essayé, par l'essai de traction, à l'état où il se trouve en sortant des laminoirs. Pour le produit destiné à être recuit ou traité autrement avant d'être employé, une section, grandeur naturelle, de la longueur de l'éprouvette employée dans l'essai de traction, sera traitée de la même façon, avant que l'éprouvette pour l'essai de traction en soit découpée.

12. Limite élastique apparente. — Pour les fins de ce cahier des charges, la limite élastique apparente sera déterminée par l'observation exacte de la chute du levier ou de l'arrêt dans le manomètre de la machine à essayer.

13. Échantillon pour analyse chimique. — Afin de déterminer si le produit se conforme aux limitations chimiques prescrites au paragraphe n° 2 (voir plus haut) l'analyse sera faite avec des forures provenant d'un petit lingot à essai.

VARIATION DE POIDS

14. Si la section transversale ou le poids varient de plus de 2 1/2 % de ceux qui sont spécifiés, ce sera une cause suffisante que le produit soit rejeté; à l'exception, cependant, des plaques cisaillées, pour lesquelles les variations suivantes seront permises :

h. Les plaques de 61^{kg},03 par mètre carré ou au-dessus, quand elles sont commandées au poids, ne varieront en moyenne ni de plus de 2 1/2 % au-dessus, ni de plus de 2 1/2 % au-dessous du poids théorique.

i. Les plaques de moins de 61^{kg},03 par mètre carré quand elles sont commandées au poids, ne varieront pas en moyenne plus que comme suit :

Jusqu'à 1^{m},91 de large, de 2 1/2 % au-dessus ou de 2 1/2 % au-dessous du poids théorique;

1^{m},91 de large et au-dessus, de 5 % au-dessus ou de 5 % au-dessous du poids théorique.

j. Pour toutes les plaques commandées à l'épaisseur, il sera permis un excédent moyen de poids au-dessus de celui qui correspond aux dimensions indiquées dans la commande et qui égale celui qui est spécifié dans la table suivante :

TABLE DES TOLÉRANCES COMME EXCÉDENT EN PLAQUES RECTANGULAIRES COMMANDÉES A L'ÉPAISSEUR

(Le poids de 16^{cm3},39 d'acier laminé est censé être de 0^{kg},128502.)

Plaques épaisses de 6^{mm},35 et au-dessus.

Épaisseur de plaque.	LARGEUR DE PLAQUE.		
	Jusqu'à 1^{m}.91.	1^{m},91 à 2^{m},54	Au-dessus de 2^{m}.54.
—	—	—	—
mm.	pour 100	pour 100	pour 100
6,35	10	14	18
7,94	8	12	16
9,52	7	10	13
11,11	6	8	10
12,70	5	7	9
14,29	4 1/2	6 1/2	8 1/2
15,87	4	6	8
Au-dessus de 15,87	3 1/2	5	6 1/2

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Plaques épaisses de moins de 6^{mm},35.

Épaisseur de plaque.	LARGEUR DE PLAQUE. Jusqu'à 1^{m}.27.	1^{m}.27 et au-dessus.
mm.	pour 100	pour 100
3,17 à 3,97	10	15
3,97 à 4,76	8 1/2	12
4,76 à 6,35	7	10

FINISSAGE

15. Le produit fini doit être exempt de bavures, de soufflures et de gerçures préjudiciables, et sera fini d'une manière conforme à l'usage des ouvriers.

MARQUE

16. Toute pièce d'acier finie doit être marquée du numéro de la fusion, et l'acier pour boulons doit être marqué au bout du numéro de la fusion. Les rivets, l'acier à lacer et les petites pièces pour plaques à boulons et les pièces de renfort doivent être expédiés en faisceaux, fermement liés avec du fil de fer, et pourvus du numéro de la fusion, marqué sur une étiquette en métal.

INSPECTION

17. Le fabricant accordera toutes les facilités convenables à l'inspecteur qui représente l'acheteur, pour que l'inspecteur puisse s'assurer que le produit fini est livré conformement au cahier des charges. Tous les essais et toutes les inspections s'effectueront au lieu de la fabrication et avant l'expédition.

ACIER MARTIN-SIEMENS POUR PLAQUES A CHAUDIÈRE ET POUR RIVETS

PROCÉDÉ DE FABRICATION

1. L'acier doit être fabriqué par le procédé Martin-Siemens.

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

2. Il y aura trois classes d'acier Martin-Siemens pour plaques à chaudière et pour rivets, à savoir : *acier pour collets et pour chaudières*, *acier pour foyers de chaudière et acier très doux*, qui doivent se conformer, quant à leur composition chimique, aux limites suivantes :

		Acier pour collets ou chaudières.	Acier pour foyers de chaudières.	Acier très doux.
		pour 100	pour 100	pour 100
Le phosphore	ne dépassera pas	0,06	0,04	0,04
Le soufre	—	0,05	0,04	0,04
Le manganèse		0,30 à 0,60	0,30 à 0,50	0,30 à 0,50

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3. Acier à rivets de chaudière. — L'acier pour les rivets de chaudière sera de la classe d'acier très doux, comme il est spécifié aux paragraphes n^{os} 2 et 4.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

4. Les trois classes d'acier Martin-Siemens pour plaques à chaudière et pour rivets, à savoir, acier pour collets ou pour chaudières, acier pour foyers de chaudière, et acier très doux, doivent se conformer aux qualités physiques suivantes :

	Acier pour collets et chaudières. — pour 100	Acier pour foyers de chaudière. — pour 100	Acier très doux. — pour 100
Résistance de traction, kg par mm^2	38,69 à 45,70	36,56 à 43,59	31,64 à 38,67
Limite élastique apparente —	23,20	22,50	21,09
Allongement pour 100, sur 203^{mm},2 ne sera pas au-dessous de	25	26	28

5. Modifications en allongement pour produit mince et épais. — Pour le produit ayant une épaisseur de moins de 7^{mm},94 ou de plus de 19^{mm},05, les modifications suivantes seront faites dans les demandes d'allongement :

a. Pour chaque augmentation de 3^{mm},17 d'épaisseur au-dessus d'une épaisseur de 19^{mm},05, une réduction de 1 % sera faite sur l'allongement spécifié.

b. Pour chaque diminution de 1^{mm},59 d'épaisseur au-dessous de 7^{mm},94, une réduction de 2 1/2 % sera faite sur l'allongement spécifié.

6. Essais de flexion. — Les trois classes d'acier Martin-Siemens pour plaques à chaudière et pour rivets se conformeront aux essais de flexion suivants; et à ce propos l'éprouvette sera large de 38^{mm},1, si possible, et pour tout produit épais de 19^{mm},05 ou au-dessous, l'éprouvette sera de la même épaisseur que celle du produit fini d'où elle sera découpée; mais pour le produit épais de plus de 19^{mm},05, l'éprouvette à courber pourra avoir 12^{mm},7 d'épaisseur.

Les ronds pour rivets seront essayés en gardant toute l'épaisseur d'étirage.

c. Les éprouvettes découpées du produit laminé, comme il est spécifié plus haut, seront soumises à un essai de flexion à froid, et aussi à un essai de flexion après trempe. L'essai de flexion à froid sera fait avec le produit à l'état où l'on s'en servira; et avant l'essai de flexion après trempe, l'éprouvette sera chauffée couleur cerise clair à l'obscurité, et trempée dans une eau dont la température sera entre 26°,7 et 32°,2 C.

d. L'acier pour collets ou pour chaudières, l'acier pour foyers de chaudière, et l'acier pour rivets, de même avant qu'après trempe, se courberont à froid à 180° à plat sur lui-même, sans fracture à l'extérieur de la partie courbée.

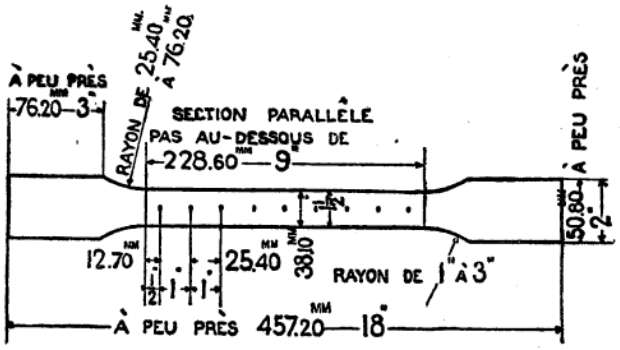
7. Essais d'homogénéité. — Pour l'acier à foyers de chaudière, un échantillon, pris d'une éprouvette rompue dans l'essai de traction, ne doit montrer ni une seule couture ni un trou qui aient une longueur de plus de 6^{mm},35 dans n'importe laquelle des trois fractures obtenues dans l'essai d'homogénéité, comme il est décrit ci-dessous au paragraphe n° 12.

ÉPROUVETTES ET CONDITIONS D'ESSAI

8. Éprouvettes pour l'essai de traction. — L'éprouvette normale d'une longueur mesurée de 203^{mm},2 sera employée pour déterminer les propriétés physiques spécifiées aux para-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

graphes nos 4 et 5. La forme normale de l'éprouvette pour plaques cisaillées sera conforme au dessin ci-dessous.



L'ÉPROUVETTE DOIT ÊTRE DE LA MÊME ÉPAISSEUR QUE LA PLAQUE.

Pour d'autres produits, l'éprouvette sera pareille à celle pour les plaques cisaillées, ou elle sera parée ou tournée, parallèle dans toute sa longueur; et, dans tous les cas où il sera possible, deux côtés opposés de l'éprouvette seront les surfaces laminées. Les ronds à rivets et les petites barres laminées seront essayés en gardant leur grandeur d'étirage.

9. Nombre des essais de traction. — Une éprouvette pour l'essai de traction sera fournie à l'état dans lequel elle sera laminée, et deux éprouvettes pour l'essai de traction seront fournies par chaque fusion de ronds à rivets. Dans le cas où l'une d'elles révélerait des soufflures ou se romprait en dehors de la troisième partie, celle du milieu, de sa longueur mesurée, il sera permis de la rejeter et d'en substituer une autre éprouvette.

10. Éprouvettes à courber. — Pour le produit épais de 19mm,05 ou au-dessous, l'éprouvette à courber gardera la surface naturelle laminée des deux côtés opposés. Les éprouvettes à courber, découpées des plaques, seront larges de 38mm,1, et pour le produit épais de plus de 19mm,05 les éprouvettes à courber pourront être épaisses de 12mm,7. Les éprouvettes à courber pour les ronds à rivets seront essayées, en gardant toute la grandeur d'étirage. L'essai de flexion pourra se faire par la pression ou par des coups.

11. Nombre d'éprouvettes pour essais de flexion. — Une éprouvette pour l'essai de flexion à froid et une éprouvette pour l'essai de flexion après trempe seront fournies par chaque plaque à l'état dans lequel elle sera laminée. Deux éprouvettes pour l'essai de flexion à froid et deux éprouvettes pour l'essai de flexion après trempe seront fournies par chaque fusion de ronds à rivets. L'essai d'homogénéité pour l'acier à foyers de chaudière se fera avec une des éprouvettes rompues dans l'essai de traction.

12. Essais d'homogénéité pour acier à foyers de chaudière. — L'essai d'homogénéité pour l'acier à foyers de chaudière se fait comme suit : une portion d'une éprouvette rompue dans l'essai de traction est encochée par un ciseau ou entaillée par une machine, en sens transversal, jusqu'à une profondeur d'à peu près 1mm,59. La première entaille doit se faire sur un côté à 50mm,8 du bout carré de l'éprouvette; la deuxième, à 50mm,8 plus loin, mais sur le côté opposé; et la troisième, à 50mm,8 de la deuxième entaille, mais sur l'autre côté. Alors l'éprouvette est mise dans un étau, de manière que la première entaille se trouve à peu près à 6mm,35 au-dessus des mâchoires. On aura soin de la serrer fermement. Le bout saillant de l'éprouvette est alors rompu au moyen d'un marteau avec lequel quelques coups légers sont frappés; l'éprouvette sera courbée vers le côté opposé à celui de l'entaille.

L'éprouvette sera cassée aux deux autres entailles par le même procédé. Le but de ce traitement est d'ouvrir et de rendre visible à l'œil des coutures, s'il y en a, qui arrivent faute de soudure ou à cause de matières étrangères qui s'y seraient introduites, ou à cause de bulles de gaz dans le lingot.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

13. Limite élastique apparente. — Pour les fins de ce cahier des charges, la limite élastique apparente sera déterminée par l'observation exacte de la chute du levier ou de l'arrêt dans le manomètre de la machine à essayer.

14. Echantillon pour l'analyse chimique. — Pour déterminer si le produit se conforme aux limitations chimiques prescrites au paragraphe n° 2 (voir plus haut) l'analyse se fera avec des forures prises dans un petit lingot à essai. Une analyse supplémentaire pour la vérification pourra se faire d'une éprouvette à essai de flexion tirée à cet effet de chaque fusion choisie pour la commande, à l'exception de l'acier à foyers de chaudière de locomotive. Pour l'acier à foyers de chaudière de locomotive, une analyse de vérification pourra se faire avec une éprouvette à essai de traction, provenant de chaque plaque, à l'état dans lequel elle sera laminée.

VARIATION DE POIDS

15. Si la section transversale ou le poids varient de plus de 2 1/2 % de ceux qui sont spécifiés, ce sera une cause suffisante pour que le produit soit rejeté, à l'exception cependant des plaques cisaillées, pour lesquelles les variations suivantes seront permises :

e. Les plaques de 61^{kg},03 par mètre carré ou au-dessus, quand elles sont commandées au poids, ne varieront en moyenne ni de plus de 2 1/2 % au-dessus, ni de plus de 2 1/2 % au-dessous du poids théorique.

f. Les plaques de moins de 61^{kg},03 par mètre carré, quand elles sont commandées au poids, ne varieront pas en moyenne plus que comme suit :

Jusqu'à 1^{m},91 de large, de 2 1/2 % au-dessus ou de 2 1/2 % au-dessous du poids théorique.

1^{m},91 de large et au-dessus, de 5 % au-dessus ou de 5 % au-dessous du poids théorique.

g. Pour toutes les plaques commandées à l'épaisseur, il sera permis un excédent moyen de poids au-dessus de celui qui correspond aux dimensions indiquées dans la commande et qui égale celui qui est spécifié dans la table suivante :

TABLE DES TOLÉRANCES COMME EXCÉDENT EN PLAQUES RECTANGULAIRES COMMANDÉES A L'ÉPAISSEUR

(Le poids de 16^{cm3},39 d'acier laminé est censé être de 0^{kg},128502.)

Plaques épaisses de 6^{mm},35 et au-dessus.

Épaisseur de plaque.	LARGEUR DE PLAQUE. Jusqu'à 1^{m},91.	1^{m},91 à 2^{m},54.	Au-dessus de 2^{m},54.
mm.	pour 100	pour 100	pour 100
6,35	10	14	18
7,94	8	12	16
9,52	7	10	13
11,11	6	8	10
12,70	5	7	9
14,29	4 1/2	6 1/2	8 1/2
15,87	4	6	8
Au-dessus de 15,87	3 1/2	5	6 1/2

Plaques épaisses de moins de 6^{mm},35.

Épaisseur de plaque.	LARGEUR DE PLAQUE. Jusqu'à 1^{m},27.	1^{m},27 et au-dessus.
mm.	pour 100	pour 100
3,17 à 3,97	10	15
3,97 à 4,76	8 1/2	12
4,76 à 6,35	7	10

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FINISSAGE

16. Tout le produit fini sera exempt de défauts de surface préjudiciables et de laminations défectueuses et doit avoir un finissage conforme à l'usage des ouvriers.

MARQUE

17. Chaque pièce d'acier finie sera marquée du numéro de la fusion et chaque plaque, aussi bien que le coupon ou l'éprouvette qui en seront découpés, devront être marqués d'une marque ou d'un numéro distincts pour l'identification. Il sera permis d'expédier l'acier pour rivets en paquets fermement liés avec du fil de fer, pourvus d'une étiquette en métal portant le numéro de la fusion.

INSPECTION

18. Le fabricant accordera toutes les facilités convenables à l'inspecteur qui représente l'acheteur pour que l'inspecteur puisse s'assurer que le produit fini est livré conformément au cahier des charges. Tous les essais et toutes les inspections s'effectueront au lieu de la fabrication et avant l'expédition.

FER FORGÉ

PROCÉDÉS DE FABRICATION

1. Le fer forgé sera fabriqué par le puddlage ou sera laminé des fagots ou des paquets composés de riblons de fer forgé, seul, ou en y ajoutant du fer ébauché plat. Il est entendu que le fer éprouvé, classe B, et le fer à entretoises ne contiendront pas de riblons.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

2. Essais de traction. — Les minima des qualités physiques demandées dans les quatre classes de fer forgé seront comme suit :

	Fer affiné.	Fer éprouvé, classe A.	Fer éprouvé, classe B.	Fer à entretoises.
	—	—	—	—
Résistance de traction. . kg par mm²	33,75	33,75	35,15	32,34
Limite élastique apparente —	17,58	17,58	17,58	17,58
Allongement pour 100, sur 203mm,2. .	15	20	25	28

3. Pour les sections qui pèsent moins de 0kg,9733 par mètre linéaire, le pourcentage d'allongement demandé dans les quatre classes spécifiées au paragraphe n° 2 sera de 11,25 %, 15 %, 18,75 % et 21 % respectivement.

4. Essais par l'entaille. — Les quatre classes de fer, après avoir été entaillées et essayées d'après la méthode indiquée au paragraphe n° 9, devront montrer les cassures suivantes :

a. Le fer affiné : une cassure en général fibreuse; exempt de grosses taches à texture grenue; pas plus de 15 % de la surface cassée ne sera granulaire.

b. Le fer éprouvé, classe A : une cassure en général fibreuse; exempt de grosses taches à texture grenue; pas plus de 10 % de la surface cassée ne sera granulaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

c. Le fer éprouvé, classe B : une fibre longue, nette et soyeuse; exempt de scorie et de crasse, ou de grosses taches à texture grenue. Quelques taches à grain fin seront permises, pourvu qu'elles ne dépassent pas en tout 10 % de la surface cassée de la barre.

d. Le fer à entretoises : une fibre longue, nette et soyeuse; exempt de scorie ou de crasse et entièrement fibreux, étant à peu près exempt de taches à texture grenue.

5. Essais de flexion à froid. — Les quatre classes de fer, lorsqu'elles seront essayées d'après la description au paragraphe n° 10, devront être conformes aux essais de flexion suivants :

e. Le fer affiné se courbera à froid à 180° autour d'un diamètre égal au double de l'épaisseur de l'éprouvette, sans qu'il y ait fracture à l'extérieur de la partie courbée.

f. Le fer éprouvé, classe A, se courbera à froid à 180° autour d'un diamètre égal à l'épaisseur de l'éprouvette, sans fracture à l'extérieur de la partie courbée.

g. Le fer éprouvé, classe B, se courbera à froid à 180° à plat sur lui-même, sans fracture à l'extérieur de la partie courbée.

h. Le fer à entretoises : une éprouvette de fer à entretoises, longue d'à peu près $0^{m},6096$, se courbera au milieu à 180° à plat sur lui-même, et ensuite il se courbera au milieu à 180° à plat sur lui-même dans un plan à angle droit par rapport au sens de la première courbure, sans fracture à l'extérieur des parties courbées. Une autre éprouvette, filetée dans toute sa longueur, supportera cette double flexion sans montrer des gerçures profondes dans les filets.

6. Essais de flexion à chaud. — Les quatre classes de fer, lors de l'essai décrit au paragraphe n° 11, devront se conformer aux essais de flexion à chaud comme suit :

i. Le fer affiné se courbera nettement à angle droit, sans montrer ni gerçures, ni soufflures.

j. Le fer éprouvé, classe A, sera courbé à 180° à plat sur lui-même, sans montrer ni gerçures, ni soufflures.

k. Le fer éprouvé, classe B, se courbera à 180° à plat sur lui-même, sans montrer ni gerçures, ni soufflures. Une barre pareille chauffée couleur jaune et subitement refroidie dans une eau d'une température entre 26°,7 et 32°,2 C. se courbera, sans que les coups se portent sur la courbe, à 180° à plat sur elle-même, sans montrer ni gerçures, ni soufflures. Une barre pareille chauffée rouge clair sera fendue au bout et chaque partie sera courbée jusqu'à un angle de 180°. Elle sera poinçonnée aussi et élargie sur un mandrin jusqu'à ce qu'il se forme un trou rond dont le diamètre ne devra pas être moins des neuf dixièmes parties de la largeur, ou bien du diamètre, de la barre. Une extension quelconque de la fente originale, ou des signes de cassures, de gerçures ou de soufflures, manifestés par ces essais, seront une cause suffisante pour rejeter tout le fer que cette barre représente.

l. Le fer à entretoises se courbera à 180° à plat sur lui-même, sans développer ni gerçures, ni soufflures. Une barre pareille chauffée jaune et subitement refroidie dans une eau d'une température entre 26°,7 et 32°,2 C. se courbera, sans que les coups se portent sur la courbe, à 180° à plat sur elle-même, sans développer ni gerçures, ni soufflures.

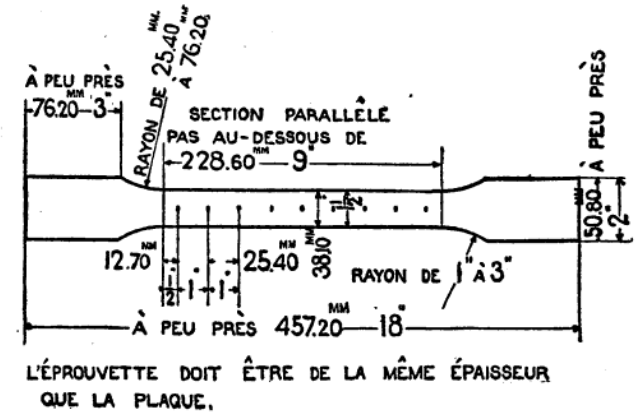
7. Essais de filetage. — Le fer pour entretoises permettra qu'un filet net et vif y soit coupé. Il devra se laminer conformément aux épaisseurs voulues, sans qu'il s'embarrasse dans les estampes à fileter.

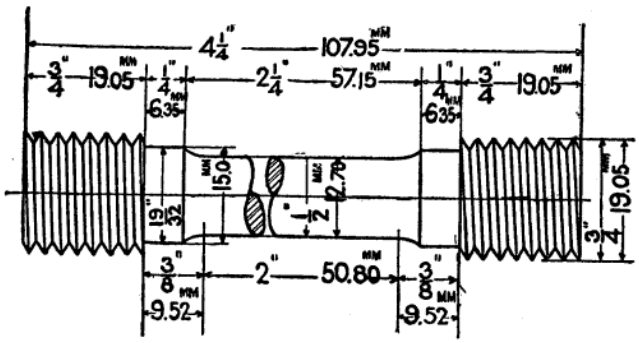
ÉPROUVETTES ET CONDITIONS D'ESSAI

8. Éprouvette pour essais de traction. — Toutes les fois qu'il sera possible, on essayera le fer, en lui gardant sa grandeur de laminage, pour déterminer les qualités physiques spécifiées aux paragraphes n^{os} 2 et 3, l'allongement étant computé sur une longueur mesurée de $203^{mm},2$. Pour le fer plat et le fer en formes trop grandes pour qu'on les essaye de leur gran-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

deur de laminage, l'éprouvette normale aura une largeur de 38mm,1 et une longueur mesurée de 203mm,2. Pour le fer rond et grand, l'éprouvette normale, d'une longueur mesurée de 50mm,8, sera employée, dont le centre se trouvera à moitié distance entre le centre et l'extérieur du rond. Les dessins de ces deux éprouvettes normales sont comme suit :





9. Essais par l'entaille. — Les essais par l'entaille se feront avec des éprouvettes découpées du fer dans l'état où il aura été laminé. L'éprouvette aura un côté légèrement et uniformément entaillé, et ensuite elle sera courbée en arrière jusqu'à un angle de 180° par suite de coups légers. Les éprouvettes de fer éprouvé, classe B, et de fer à entretoises pourront être entaillées jusqu'à une profondeur de 20° de leur épaisseur, approximativement.

10. Essais de flexion à froid. — Les essais de flexion à froid seront faits avec des éprouvettes découpées de la barre dans l'état où elle aura été laminée. L'éprouvette se courbera jusqu'à un angle de 180°, par la pression ou par une suite de coups légers.

11. Essais de flexion à chaud. — Les essais de flexion à chaud seront faits avec des éprouvettes découpées de la barre dans l'état où elle aura été laminée. Les éprouvettes chauffées rouge vif se courberont jusqu'à un angle de 180°, par la pression ou par une suite de coups légers, sans que les coups se portent directement sur la courbe.

Si on le désire, une barre pareille de n'importe laquelle des quatre classes de fer devra être travaillée et soudée de la manière usitée, sans qu'elle présente des signes de cassure à chaud.

12. Limite élastique apparente. — La limite élastique apparente spécifiée au paragraphe n° 2 devra être déterminée par l'observation exacte de la chute du levier ou de l'arrêt dans le manomètre de la machine à essayer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

FINISSAGE

13. Tout le fer forgé doit être droit, uni et exempt de taches de cendre ou de soufflures, de plis, de chambres et de gerçures. A mesure que l'épaisseur des barres approchera du maximum de la capacité des laminoirs, on n'exigera pas la même perfection de finissage qu'on exige pour les barres plus minces.

Pour les barres plates et les carrées, une variation de $0^{mm},79$ dans les deux sens de la grandeur commandée sera permise.

Pour le fer rond, une variation de $0^{mm},254$ dans les deux sens de la grandeur commandée sera permise. Mais le fer pour entretoises sera pour le moins de $0^{mm},254$ et pas plus de $0^{mm},625$ au-dessous de la grandeur normale, afin d'éviter qu'il ne s'embarrasse dans les estampes à fileter.

INSPECTION

14. Le fabricant accordera toutes les facilités convenables à l'inspecteur qui représente l'acheteur pour que l'inspecteur puisse s'assurer que le produit fini est livré conformément au cahier des charges. Tous les essais et toutes les inspections s'effectueront au lieu de la fabrication et avant l'expédition.

ALBERT LADD COLBY.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

X

LES ACIERS AU NICKEL

COMMUNICATION

Présentée par M. Ch.-Éd. GUILLAUME

PHYSICIEN DU BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

INTRODUCTION

Les alliages de fer et de nickel sont intéressants à un double point de vue. D'une part, certains d'entre eux possèdent des qualités mécaniques qui les rendent précieux pour la construction des machines; d'autre part, ils présentent une série d'anomalies qui font de leur étude une source de nombreuses surprises.

Au début, les investigations furent limitées aux alliages ne contenant, en dehors du fer et du nickel, que de faibles proportions de corps étrangers; c'est dans ces conditions que l'on put établir les lois approximatives suivant lesquelles varient les propriétés de ces alliages avec les proportions des composants principaux. Mais, depuis peu d'années, les essais ont été étendus à des alliages riches en carbone, en manganèse et même en chrome, et l'on a constaté que des proportions relativement importantes de ces corps sont susceptibles de modifier les lois précédemment trouvées au point de les dénaturer complètement.

Il est donc nécessaire d'établir, dès le début, une distinction entre les ferro-nickels à peu près purs, et les alliages à haute teneur en corps étrangers. Il est évident, d'ailleurs, que les faibles quantités de manganèse ou de carbone introduites dans les premiers par les besoins des opérations métallurgiques, suffisent déjà à fausser d'une façon appréciable les lois auxquelles obéiraient les alliages purs non encore réalisés. Il sera facile, par la comparaison des résultats, de prévoir le *sens* dans lequel les lois trouvées devront être modifiées pour correspondre aux alliages purs. Toutefois, les expériences ne sont encore ni assez nombreuses, ni assez bien réparties pour qu'il soit possible d'évaluer *numériquement* cette extrapolation.

Parmi les résultats trouvés dans la direction explorée surtout par les physiciens, il en est peu qui correspondent immédiatement aux préoccupations du Congrès. On n'y trouve qu'un petit nombre de données relatives à l'élasticité (module ou limite), et moins encore sur les charges de rupture et les allongements des alliages industriels. Jusqu'ici, ces propriétés, étudiées dans quelques aciéries, ou par les commissions de réception et d'examen des matériaux pour les services de l'État, n'ont donné lieu qu'à des publications rares et incomplètes, de telle sorte que nous en serons remis à des travaux déjà anciens pour l'indication de quelques résultats beaucoup dépassés aujourd'hui. Je sortirais d'ailleurs de mon domaine en insistant sur cette partie de la question et je limiterai ce rapport presque entièrement aux propriétés physiques des aciers au nickel.

Il est important de noter, dès maintenant, que toutes les propriétés de ces alliages sont solidaires, et qu'une étude approfondie de quelques-unes d'entre elles fournit déjà de nombreuses indications pour les autres. C'est pour cette raison que ce rapport, dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lequel les propriétés mécaniques ne seront qu'effleurées, pourra néanmoins constituer une utile introduction à un travail ultérieur qui leur sera plus exclusivement consacré.

Si l'emploi industriel des alliages de fer et de nickel est relativement récent, en revanche, les premières tentatives de production de ces alliages sont déjà anciennes. C'est ainsi que, dès les années 1820 et 1821, Stodart fit préparer, dans les aciéries Sanderson, à Sheffield, des alliages contenant jusqu'à 50 % de nickel. Il reconnut déjà que l'acier à 3 % possède les qualités d'un métal industriel.

Vers la même époque, Berthier, en France, et Wolf, à Schweinfurth, fabriquèrent des alliages de fer et de nickel; Liebig cite ces derniers dans une note des *Annalen der Pharmacie* (1832), et le professeur Otto Vogel réclamait récemment pour Wolf, avec raison suivant M. Hadfield, l'honneur du premier emploi industriel de ces alliages, qui furent mis en vente sous le nom d'aciers météoriques par analogie avec la composition de certaines météorites.

L'acier-nickel semble avoir fait sa première apparition en grande quantité à l'Exposition de New-York, en 1853, où M. Thurber en exhiba divers échantillons.

Mais le grand essor des alliages de fer et de nickel date de l'époque où, le prix de ce dernier métal s'étant considérablement abaissé, tandis que son traitement par de petites quantités de magnésium augmentait beaucoup sa pureté, on put obtenir des alliages à haute teneur et de qualité supérieure.

En 1885, les aciéries de Montataire, de la Société le Ferro-nickel, produisirent, sous la direction de M. Marbeau, des alliages qui prirent bientôt une place importante sur le marché. Les aciéries d'Imphy, de la Société de Commentry-Fourchambault, suivirent de près, en 1887. Aujourd'hui un certain nombre des grands établissements métallurgiques fabriquent couramment des aciers au nickel, surtout à faible teneur [1].

PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES

L'absence de magnétisme d'un alliage à 25 % de nickel préparé par la Société le Ferro-nickel est la première propriété magnétique singulière constatée dans les aciers au nickel. Le Dr J. Hopkinson fit une constatation plus inattendue encore, c'est que cet alliage, soumis à une température très basse, passe à l'état magnétique et conserve indéfiniment son nouvel état lorsqu'il est revenu à la température ordinaire, et le perd seulement lorsqu'on le chauffe au rouge. J. Hopkinson étudia sommairement quelques alliages des teneurs voisines, et trouva qu'à mesure qu'on s'éloigne de la teneur de 25 %, la température du passage à l'état magnétique s'élève, dans un sens comme dans l'autre. Il trouva que les propriétés des alliages de plus faible teneur ne diffèrent que par le relèvement du point de transformation de ceux que présente l'alliage à 25 %, mais il ne semble pas avoir vu bien nettement que les alliages à plus forte teneur se comportent d'une façon essentiellement différente.

Au cours d'une série de recherches sur les alliages de diverses teneurs préparés a Imphy, sous la direction de M. Adenot, et avec la collaboration de MM. Girin et Dauphin [2], j'eus l'occasion d'examiner ces phénomènes de plus près. Mes recherches confirmèrent absolument celles d'Hopkinson pour les alliages d'une teneur inférieure à 25 %, en les

1. Cette période d'essai est relatée en détail dans l'excellente publication de M. Hadfield : *Alloys of Iron and Nickel*, parue au tome CXXXVIII des *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1899, qui contient une grande quantité de documents relatifs à la question qui nous occupe.

On consultera aussi avec intérêt les travaux d'ensemble suivants : Le rapport de M. F. Gautier sur les alliages ferro-métalliques présenté au Congrès international des mines et de la métallurgie en 1889. — L'ouvrage de MM. Hallopeau et Campredon : *La Métallurgie, fonte, fers, aciers, à l'Exposition universelle de* 1889, Paris, Bernard, 1893. — Le mémoire présenté par M. James Riley, *Alloys of Iron and Nickel* au « Iron and Steel Institute », en 1889. — Enfin l'ouvrage de MM. Moissan et Ouvrard, *Le Nickel*, paru dans l'*Encyclopédie* Léauté.

Les mémoires proprement dits seront cités au cours du rapport.

2. Je désire rendre hommage à la largeur de vues et au désintéressement avec lequel M. Fayol, directeur général de la Société de Commentry-Fourchambault et Decazeville, et M. Dumas, secrétaire général de cette Société, m'ont fourni les moyens d'entreprendre cette étude, en mettant à ma disposition les nombreux alliages nouveaux qu'elle nécessitait.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

complétant sur un point, c'est que le passage de l'état non magnétique à l'état magnétique, comme le passage inverse à température élevée, est graduel, et qu'un alliage de cette catégorie peut demeurer indéfiniment à un état intermédiaire compris entre les deux états limites que peuvent atteindre les alliages. Pour les teneurs supérieures à 25 %, je trouvai que les propriétés magnétiques des alliages étaient seulement fonction de la température actuelle.

Un alliage de la première catégorie refroidi depuis le rouge reste non magnétique tant qu'il n'a pas atteint une certaine température θ_1; si on le refroidit davantage, le magnétisme apparaît graduellement suivant une courbe ABC (fig. 1), et la transformation n'est complète

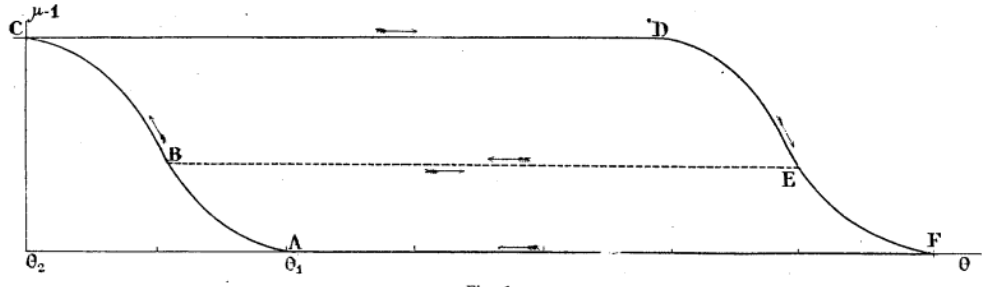


Fig. 1.

qu'à une température θ_2 qui peut différer de θ_1 de plus de 200 degrés. On peut arrêter le refroidissement à une température quelconque, θ', et réchauffer l'alliage; il conserve alors sensiblement les propriétés acquises le long de la courbe ABC, et ne les modifie d'une manière évidente que si l'on vient à rejoindre l'une des deux courbes de transformation, ABC ou DEF. Dans un cas, le magnétisme augmente, dans l'autre il diminue; aussi longtemps que les deux courbes n'ont pas été recoupées, les propriétés magnétiques restent représentées par la droite BE. Cet ensemble de propriétés m'a engagé à désigner les alliages qui les possèdent par le qualificatif d'*irréversibles;* les autres sont les alliages *réversibles.*

La position des deux courbes de transformation est fonction de la teneur en nickel de l'alliage. M. Osmond[1] a fixé cette relation pour la première fois d'une manière précise par des expériences consistant à laisser refroidir une tige d'alliage entourée d'une spirale parcourue par un courant, et placée en face d'un magnétomètre. L'induction produite dans la tige est indiquée par la déviation de l'aiguille, tandis que la température est mesurée par un couple Le Chatelier.

Le diagramme suivant (fig. 2) indique, par la courbe supérieure, la disparition du magné-

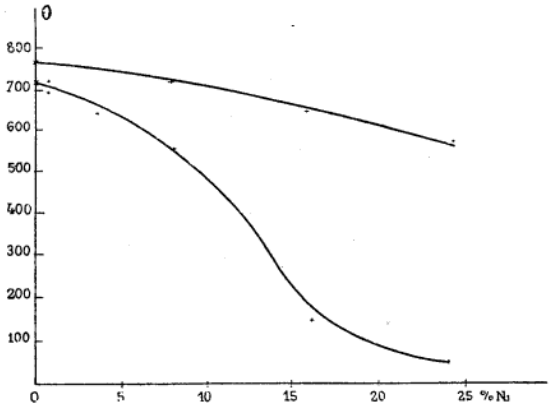


Fig. 2.

tisme à l'échauffement, c'est-à-dire la fin de la transformation aux températures élevées, et

1. Voir diverses notes présentées par M. Osmond à l'Académie des sciences dans les années 1898 et 1899 et un mémoire publié à la suite de celui de M. Hadfield précédemment cité : *Experiments on Alloys of Iron and Nickel,* 1899.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par la courbe inférieure, la première apparition du magnétisme, c'est-à-dire le début de la transformation par refroidissement.

On voit que, à mesure que la teneur en nickel augmente, les deux transformations s'écartent de plus en plus. Transportée dans notre premier diagramme, cette indication se traduit par un faible recul de la courbe DEF, et par un mouvement rétrograde de la courbe ABC s'étendant sur un intervalle d'environ 650 degrés. Sensiblement superposées pour le fer pur, les courbes se séparent pour les plus petites quantités de nickel, laissant entre elles un intervalle grandissant, où l'alliage peut exister à tous les états entre les extrêmes.

Mes expériences, dont quelques-unes sont antérieures à celles de M. Osmond, ont donné, dans la transformation inférieure, que j'ai seule suivie de près, des résultats très voisins des siens. Toutefois, j'ai observé le début de la transformation à des températures un peu plus basses, ce qui peut provenir, comme nous le verrons, d'une teneur un peu plus forte en carbone des alliages dont je disposais.

On admet, en général, que les phénomènes irréversibles qui viennent d'être décrits, cessent lorsqu'on dépasse la teneur de 25 %, et que, pour cette dernière, la transformation inférieure commence très près de 0°. Toutefois, M. Osmond a trouvé un alliage irréversible contenant 29 % de nickel. J'ai trouvé, dans un alliage à 26 %, des phénomènes faiblement irréversibles, en ce sens que cet alliage, après un refroidissement énergique, conservait, aux températures ordinaires, un faible reste de la susceptibilité magnétique qu'il possédait aux températures basses. Cette particularité peut être due à un léger défaut d'homogénéité de l'alliage [1].

Comme nous le verrons plus loin, les alliages irréversibles durcissent en passant à l'état magnétique, tandis qu'ils sont malléables à l'état non magnétique. Il y a donc un grand intérêt pratique à retarder leur transformation, de manière à leur assurer, en toutes circonstances, la malléabilité qui les fait rechercher dans l'industrie. On y parvint pour la première fois, d'une façon complète, aux aciéries d'Imphy, grâce à une addition de chrome aux alliages d'une teneur en nickel peu inférieure à 25 %. Les alliages de cette catégorie, contenant seulement 2 à 3 % de chrome, restent non magnétiques, même dans l'air liquide, ainsi que nous avons pu le constater dès le mois de mai 1897, grâce à l'extrême obligeance de M. le professeur J. Dewar.

M. Osmond montra, il y a près d'un an, que le manganèse ou le carbone produisent des effets analogues. Mais l'ensemble le plus complet d'expériences sur ce point particulier est dû à M. L. Dumas, qui, opérant sur plus de 40 alliages préparés à Imphy, a pu suivre l'action progressive du carbone, du chrome et du manganèse, sur la position de la région de transformation [2].

Dans une première série d'alliages, on constitua un certain nombre de groupes de teneurs en nickel voisines, et de teneurs croissantes en carbone, sans chrome. Le manganèse croissait avec le carbone, dont il est un bon dissolvant, mais ne s'écartait pas sensiblement des

1. Dans une note publiée pendant la correction des épreuves de ce Rapport, M. L. Dumas donne une théorie très ingénieuse et apparemment satisfaisante de cet empiètement des deux régions l'une sur l'autre. M. Dumas admet que le magnétisme du fer et celui du nickel conservent leur caractère dans tous leurs alliages; apparemment toute addition d'un corps étranger au fer sépare ses deux transformations et donne à l'alliage les signes visibles de l'irréversibilité, en abaissant très fortement la température de passage à l'état magnétique et faiblement la température de la transformation inverse. Les additions faites au nickel abaissent aussi, en général, la température de transformation réversible. Une exception existe cependant pour les additions de fer, qui produisent d'abord un faible relèvement, bientôt suivi d'un abaissement considérable. Au voisinage de 25 %, pour les alliages à peu près purs de fer et de nickel, la courbe inférieure du fer et la courbe unique du nickel se coupent sans s'influencer, de telle sorte qu'au dessous de cette teneur, on rencontre successivement, à température descendante, la transformation irréversible du fer et la transformation réversible du nickel, tandis qu'au-dessus les deux courbes se présentent dans l'ordre inverse; les alliages doivent donc, dans cette deuxième région, être d'abord magnétiques réversibles, puis aux températures plus basses magnétiques irréversibles.

Le dernier phénomène est très apparent, tandis qu'en général, dans les alliages d'une teneur inférieure à 25 %, la transformation irréversible masque complètement la transformation réversible. Celle-ci ne devient apparente que dans les alliages riches en éléments qui, comme le carbone, abaissent notablement la première sans agir fortement sur la seconde. L'alliage à 24,60 % de nickel et 0,64 de carbone (voir p. 5) nous en donne un exemple. Dans sa dernière note, M. Dumas cite, dans la seconde catégorie, un alliage contenant 28,82 de nickel et 0,11 de carbone dont le magnétisme réversible apparaît vers + 90° et le magnétisme irréversible vers — 60°. (Voir *Sur les transformations allotropiques des alliages de fer et de nickel.* Comptes rendus, t. CXXX, p. 1311.)

2. L. Dumas, *Sur la position des points de transformation magnétique des aciers au nickel* (Comptes rendus de l'Académie des sciences, 3 juillet 1899).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teneurs normales. Les propriétés magnétiques furent déterminées sur de petits échantillons, avant tout refroidissement, puis pendant et après l'immersion dans la neige carbonique ou l'air liquide, mis à la disposition de M. Dumas par M. d'Arsonval. Le magnétisme acquis par la plupart de ces alliages aux températures basses était généralement permanent, c'est-à-dire que leur transformation avait été irréversible. Pour quelques-uns d'entre eux, il était passager; pour l'un même, il était non permanent après la neige carbonique, et permanent après l'air liquide[1].

Voici l'ensemble des résultats de M. Dumas sur cette série d'alliages :

	COMPOSITION CHIMIQUE POUR 100.				MAGNÉTISME.		
	CARBONE.	SILICIUM.	MANGANÈSE.	NICKEL.	A + 15°.	A — 78°.	A — 188°.
I.	1,37	0,41	2,71	10,00	très faible	très faible	permanent
II.	0,07	0,25	1,45	15,48	très fort	très fort	
	0,19	0,12	0,73	14,55	très fort	très fort	
	0,73	0,38	0,41	15,92	très faible	permanent	
	1,03	0,37	1,22	14,44	nul	permanent	
	1,13	0,38	1,89	15,88	nul	nul	permanent
	1,36	0,55	2,07	14,80	nul	nul	
III	0,15	0,15	0,31	24,06	très faible	permanent	
	0,34	0,22	0,51	24,04	très faible	permanent	
	0,41	0,23	0,11	24,05	nul	permanent	
	0,64	0,27	0,88	24,61	nul	nul	non permanent
	0,85	8,47	1,41	23,35	nul	nul	
IV	0,39	0,23	0,43	25,38	nul	permanent	
	0,62	0,41	0,80	25,45	nul	non permanent	
V.	0,23	0,17	0,18	27,12	nul	permanent	
	0,25	0,14	0,36	27,72	très faible	non permanent	permanent

Le premier alliage, à haute teneur en carbone qui, d'après les expériences de M. Osmond, devrait, pour une faible teneur, se transformer à partir de 400°, n'a atteint la région de transformation qu'à des températures comprises entre — 78° et — 188°.

Ceux du second groupe, dont la transformation devrait débuter vers 200°, sont ramenés au-dessous de 0° par 1 % de carbone, et à des températures beaucoup plus basses par des teneurs très peu supérieures.

Les autres groupes font ressortir surtout ce fait, que les alliages peuvent appartenir à la catégorie réversible ou irréversible non seulement en raison de leur teneur en nickel, mais aussi par l'action du carbone ou du manganèse. C'est ainsi que nous voyons un alliage à 24,61 % de nickel parmi les réversibles, tandis qu'un alliage à 27,12 % est irréversible.

Le tableau suivant montre l'action combinée des éléments précédents et du chrome. On voit aisément, par la comparaison des chiffres, que ce dernier élément agit dans le même sens que les autres, en abaissant le point de transformation, de manière à l'amener au-dessous de 0°, déjà pour des teneurs en nickel où il se trouverait au voisinage de 600°, pour des ferro-nickels à peu près purs.

Les résultats trouvés avec le premier alliage d'Imphy sont ainsi considérablement étendus et généralisés.

1. Voir note 1, p. 4.

Tableau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

	COMPOSITION CHIMIQUE POUR 100.					MAGNÉTISME.		
	CARBONE.	SILICIUM.	CHROME.	MANGANÈSE.	NICKEL.	A $+15^{0}$.	A -78^{0}.	A -188^{0}.
VI.	0,36	0,47	14,4	0,60	0,9	très fort	très fort	très fort
VII.	0,52	0,24	2,83	0,59	4,95	très fort	très fort	
	1,14	»	3,12	0,93	5,05	très faible	très faible	
	2,13	0,54	3,92	5,05	4,96	nul	nul	
VIII	1,77	0,40	3,19	2,78	7,28	nul	nul	nul
IX.	0,31	0,42	2,92	0,46	10,20	très fort	très fort	
	0,73	0,58	2,70	0,61	12,04	nul	permanent	
	1,10	0,34	3,55	0,91	13,34	nul	nul	nul
X.	0,07	0,23	2,74	0,96	17,24	très fort	très fort	
	0,19	0,31	0,98	0,26	17,50	très fort	très fort	
	0,29	0,30	9,05	0,13	15,50	nul	nul	nul
	0,33	0,21	2,83	0,60	15,08	nul	permanent	
	0,40	0,47	1,75	0,63	16,06	nul	permanent	
	0,50	0,24	1,77	0,53	16,68	nul	permanent	
	0,53	0,35	3,02	0,82	16,05	nul	nul	nul
	0,71	0,58	2,02	1,17	16,16	nul	nul	
XI.	0,10	0,21	0,43	0,32	21,84	très fort	très fort	
	0,27	0,23	0,56	0,45	22,08	très fort	très fort	
	0,28	0,29	0,59	0,36	23,06	nul	permanent	
	0,30	0,23	0,53	0,27	23,73	nul	permanent	
	0,31	0,25	5,29	0,23	24,20	nul	nul	non permanent
	0,45	0,35	0,28	0,66	23,26	nul	nul	permanent
XII.	0,63	0,94	2,53	0,41	27,16	très faible	non permanent	non permanent

Nous avons considéré jusqu'ici les deux courbes de transformation pour un même alliage comme invariables en forme et en position sur l'échelle des températures. Il semble en effet, qu'il en soit ainsi pour toutes les portions de ces courbes situées à des températures élevées; mais on peut noter ici, et l'on verra ultérieurement avec plus de détail, que les transformations aux températures basses peuvent éprouver des retards singuliers, et tels que les courbes par lesquelles nous les avons représentées changent absolument de caractère.

On peut provoquer le passage à l'état magnétique des alliages irréversibles non seulement par l'action du froid, mais aussi, dans une région de températures supérieure à la courbe de transformation, par tout travail mécanique, forgeage à froid, tournage, tréfilage, etc. Hopkinson avait déjà indiqué ce fait curieux, c'est que la limaille d'un alliage non magnétique de cette catégorie est généralement magnétique[1].

Il semble donc que, dans un intervalle de température supérieur à la courbe de transformation, et qui paraît assez étendu, la tendance des alliages soit de passer à l'état magnétique, qui est leur état d'équilibre, et qui, à l'exception des retards mentionnés à l'instant, s'établit forcément, et à l'extrême limite, le long de la courbe de transformation par le froid, sans le concours d'aucun ébranlement moléculaire.

Il serait évidemment très intéressant de savoir si la transformation supérieure est aussi précédée d'une région dans laquelle la tendance soit la disparition du magnétisme, mais il ne semble pas qu'aucune expérience faite jusqu'ici permette de répondre à cette question. S'il en était ainsi, il existerait probablement, pour chaque alliage, une zone peut-être très étroite d'équilibre stable, magnétique ou non magnétique, suivant l'état actuel de l'alliage. Pour fixer les idées, on pourrait supposer, par exemple, qu'un alliage contenant 25 % de nickel, est stable à l'état magnétique au-dessous d'une certaine température, et stable à l'état non magnétique au-dessus. Aux températures inférieures, tout ébranlement moléculaire ferait passer l'alliage à l'état magnétique; au-dessus, il le transformerait dans la variété non magnétique. Mais il se peut aussi qu'à chaque température corresponde un

1. Suivant les idées de M. Dumas, cet effet peut être dû à plusieurs causes superposées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

état intermédiaire assurant le maximum de stabilité[1], et que le travail mécanique amène, à chaque température, l'alliage à cet état. Les expériences susceptibles de nous renseigner sur ce point sont évidemment délicates, mais ne semblent pas présenter de difficultés insurmontables.

Les indications données par les alliages à haute teneur en éléments étrangers montrent, à l'évidence, que les alliages de fer et de nickel purs rencontrent la courbe de transformation inférieure à une température plus élevée que celle qui a été déterminée par toutes les expériences faites jusqu'ici. On peut déduire des expériences de M. Osmond et de celles de M. Dumas, une valeur grossièrement approximative de l'action du carbone, qui est d'abaisser d'une quarantaine de degrés la courbe de transformation pour chaque millième dont sa teneur augmente. L'action du chrome, isolé du carbone, ne peut pas encore être évaluée en partant des expériences publiées; la comparaison des nombres contenus dans le deuxième tableau des expériences de M. Dumas montre qu'il n'est évidemment pas proportionnel à la teneur, mais que, vers 15 % de nickel, les premières additions de chrome agissent, sur la position de la transformation, environ quatre fois moins que le carbone; cette indication est, il est vrai, encore plus incertaine que la première. Une étude complète des alliages examinés par M. Dumas pourrait conduire à des nombres plus approchés.

On ne sait pas encore quelle est l'influence des corps étrangers sur l'*allure* de la transformation.

Les résultats qui viennent d'être analysés montrent, tout d'abord, que la limite entre les alliages réversibles et les irréversibles n'est pas absolument tranchée. D'une part, certains d'entre eux participent, à la fois, aux deux catégories, étant réversibles pour des refroidissements modérés, irréversibles pour des actions plus énergiques, ou légèrement irréversibles même pour des refroidissements peu intenses. D'autre part, cette limite ne dépend pas uniquement de la teneur en nickel, mais aussi des autres corps, et peut-être des conditions de la fusion et du traitement ultérieur de l'alliage.

Mais, si l'on fait abstraction de ces exceptions, et, dans tous les cas, lorsqu'on s'éloigne franchement de la limite vers les fortes teneurs, on constate que les alliages sont assez complètement réversibles pour que des mesures précises puissent seules montrer si leur transformation subit des retards dans les deux sens. Les indications un peu différentes trouvées par M. Osmond peuvent tenir, comme il le fait observer, à un écart de température sensible entre le couple thermo-électrique et le barreau d'acier, que l'on chauffait et refroidissait dans l'air; il convient de remarquer, en effet, que ces alliages sont très mauvais conducteurs, et qu'il peut exister des différences de température très sensibles entre leur surface et les parties profondes.

Les expériences que j'ai faites sur ces alliages, en les arrachant d'un pôle d'aimant dans un bain d'huile, ont montré que les courbes obtenues dans les deux sens de la variation de la température sont sensiblement superposées lorsque la marche de la température n'est pas trop rapide. Les expériences faites par M. E. Dumont sur des fils enfermés dans une bobine, ont conduit à un résultat analogue.

Mes expériences, exécutées par une méthode rudimentaire, ne pouvaient pas fournir des données correctes sur la variation de perméabilité avec la température; en revanche, elles m'ont permis de voir que les propriétés magnétiques s'abaissent graduellement à mesure que la température s'élève, suivant une courbe qui se raccorde à l'axe des abscisses. Le point de raccordement est très difficile à déterminer; on peut même dire que la position qu'on est conduit à lui assigner dépend exclusivement de la sensibilité du procédé employé pour déceler les dernières traces de magnétisme. Mais on peut fixer avec précision la position d'un point A caractéristique pour chaque alliage, celui où la dernière partie de la courbe expérimentale, prolongée par extrapolation, rencontre l'axe des températures (fig. 3). La position du point A est essentiellement fonction de la teneur en nickel, et peut être représentée, au moins entre 26 et 45 % de nickel, par la fonction

$$\theta = 34{,}1\,(n - 26{,}7) - 0{,}80\,(n - 26{,}7)^2$$

dans laquelle n désigne le pourcentage de nickel. L'action des corps étrangers sur la forme

1. Les phénomènes observés dans les alliages réversibles rendent cette hypothèse assez vraisemblable.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de cette fonction n'a pas été étudiée en détail, mais il est certain qu'elle est beaucoup moins importante que dans les alliages irréversibles.

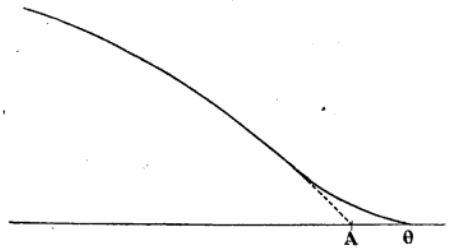


Fig. 3.

La forme de la variation de la perméabilité avec la température a été étudiée par M. E. Dumont. Le diagramme (fig. 4) montre, d'après ses expériences, la forme de la variation du magnétisme avec la température pour une série d'alliages dont la teneur va en augmentant de n_1 à n_5. On voit que, pour chacun des alliages, la perméabilité commence

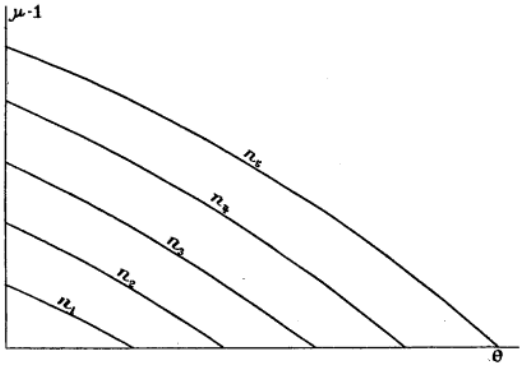


Fig. 4.

à s'abaisser à une température très éloignée de celle de perte totale du magnétisme. Les courbes représentant l'abaissement graduel de cette propriété montrent, de plus, que l'apparition du magnétisme au refroidissement se produit, dans tous les alliages de cette catégorie, suivant une fonction qui dépend essentiellement de la température, comptée à partir du point de perte totale de magnétisme, non point que les courbes relatives à chaque alliage soient rigoureusement superposables par simple glissement parallèlement à l'axe des températures, mais cette superposition est à peu près complète sur un intervalle de température assez étendu.

On peut aisément déduire, de ce premier diagramme, un autre réseau de courbes dont chacune correspond à une température déterminée, et indique, pour cette température, la relation qui existe entre la teneur en nickel et la perméabilité magnétique. Ce réseau se compose de lignes à peu près droites et parallèles, montant rapidement en même temps que la teneur en nickel.

Les expériences de M. Dumont font connaître la valeur de la perméabilité en fonction du champ pour des valeurs peu élevées de celui-ci. Je renverrai, pour cette question, au mémoire original[1].

Les expériences de M. Dumont ont été faites, comme les miennes, sur des alliages d'Imphy; M. Osmond, qui en a répété quelques-unes sur les mêmes alliages, a trouvé des résultats pratiquement identiques avec ceux qui viennent d'être énoncés; des alliages Hadfield, au contraire qui, par leur teneur, devraient être entièrement réversibles, lui ont

1. E. Dumont, *Recherches sur les propriétés magnétiques des aciers au nickel* (*Archives de Genève*, 4e période, t. V, p. 331, 1898).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

révelé une faible irréversibilité aux températures élevées, se confondant, plus bas, avec la transformation réversible.

Quelques expériences faites sur des alliages chromés, contenant environ 30 % de nickel, ont montré un abaissement plus lent du magnétisme avec la température que dans les alliages non chromés. L'action du chrome sur la position du point de perte totale du magnétisme des alliages réversibles est encore mal connue. Un fait bien net a été cependant mis en lumière par M. Dumas; c'est que le chrome, ajouté en grande quantité au nickel avec peu de fer abaisse considérablement la température du passage à l'état magnétique. Ainsi, les trois alliages

COMPOSITION CHIMIQUE POUR 100.

CARBONE.	SILICIUM.	CHROME.	MANGANÈSE.	FER (1).
0,11	0,23	9,87	0,70	1,65
0,46	0,52	9,40	1,72	1,75
0,96	0,49	9,62	1,45	1,45

étaient non magnétiques dans la neige carbonique, et magnétiques dans l'air liquide.

PROPRIÉTÉS THERMIQUES. — TRANSFORMATIONS SECONDAIRES

Dans les expériences de M. Osmond qui viennent d'être décrites, il suffisait d'inscrire les valeurs de la température en fonction du temps, pendant la chauffe ou le refroidissement, pour se faire une idée des quantités de chaleur dégagées pendant les transformations. Par ce procédé, les points de transformation que n'indiquait pas l'étude magnétique, sont devenus parfaitement évidents. Les plus faibles additions de nickel abaissent simultanément la position des points $Ar\,1$, $Ar\,2$ et $Ar\,3$ (refroidissement) d'une cinquantaine de degrés pour 1 % de nickel. Puis, lorsque la teneur en nickel augmente, les points se confondent en un seul, peut-être par un groupement des trois transformations, ou, plus probablement, suivant M. Werth, par la disparition du point $Ar\,1$ (le carbone restant à l'état de graphite) et par le groupement de $Ar\,2$ et 3. Les transformations 2 et 3 sont déjà confondues à 4 % de nickel, à 200 degrés environ au-dessous du point $Ar\,3$ pour l'acier au carbone. $Ar\,1$ existe encore, mais il est à peine perceptible vers 8 %.

Le retard de refroidissement est beaucoup plus accentué dans le double point qu'il ne devrait être par la simple superposition des deux transformations confondues. Ces dernières sont donc exagérées dans les aciers au nickel, montrant l'apport propre du nickel dans le phénomène. Les points tendent aussi à se confondre à la chauffe, $Ac\,1$ et 2 étant déjà réunis pour 0,27 % de nickel. $Ac\,3$ se confond avec ce double point avant 8 %.

Les transformations des alliages réversibles sont trop lentes pour devenir bien évidentes dans les expériences de refroidissement qui, en effet, n'ont rien enseigné de bien précis à ce sujet. Il serait nécessaire d'aborder cette question par les méthodes calorimétriques ordinaires.

VARIATIONS DE VOLUME

J. Hopkinson, le premier, attira l'attention sur une anomalie singulière des aciers au nickel irréversibles. Il trouva, en effet, qu'un échantillon d'un de ces alliages avait diminué de densité de 2 % environ dans le passage à l'état magnétique.

En 1895, M. J.-René Benoit montra qu'un alliage à 22 % de nickel et 2 % de chrome non magnétique, se dilatait à peu près comme un laiton. A la même époque, M. A. Le Chatelier trouva que les alliages irréversibles sont beaucoup plus dilatables à l'état non magnétique

1. Nickel par différence.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qu'à l'état magnétique. On sait, d'ailleurs, par les recherches de M. H. Le Chatelier, qu'il en est de même du fer et du nickel.

Je trouvai, à mon tour, en 1896, qu'un alliage contenant 30 % de nickel est sensiblement moins dilatable que le platine. Ces faits isolés, très curieux, m'engagèrent à étudier plus complètement l'ensemble de l'anomalie dont ils dépendent. Mes mesures ont été faites au Bureau international des Poids et Mesures, soit par la méthode très précise du comparateur, entre 0° et 38° environ, soit par une méthode consistant à rapporter les variations de la barre à étudier à celles d'une barre de laiton, que l'on fixait à la première, par une de ses extrémités, tandis que l'autre portait une échelle divisée se déplaçant devant un trait très fin, tracé sur la règle d'acier-nickel. Grâce à l'emploi d'un bain d'alcool ou d'huile de palme, les mesures ont pu être poussées, par ce procédé, jusqu'à —60° pour certaines règles, pour d'autres jusqu'à + 220°, suivant l'intérêt présenté par des régions déterminées de l'échelle des températures. Toutes les mesures, par les deux procédés, ont été faites sur des barres ayant approximativement 1 mètre de longueur, utile [1].

Alliages irréversibles.

L'étude de ces alliages a été faite, en majeure partie, par le deuxième procédé de mesure. On a trouvé ainsi que, pendant que les alliages irréversibles reprennent graduellement leur magnétisme par le refroidissement, ils augmentent de volume *graduellement* aussi, et *d'une manière irréversible.*

Les expériences les plus complètes ont été faites avec un alliage contenant 15 % de nickel environ ; d'autres alliages ont été soumis à des études partielles qui ont confirmé les résultats obtenus sur le premier, et montré que, si l'on s'en tient aux traits généraux du phénomène, on peut l'identifier dans les divers alliages.

Ce qui a été dit plus haut pour la position de la transformation magnétique est exactement confirmé par l'étude des variations de volume.

Pour mesurer ses variations, la barre d'alliage à étudier était d'abord chauffée au rouge dans un four, les deux extrémités émergeant seules. Lorsqu'on avait constaté, au moyen d'un aimant, qu'à l'exception de quelques centimètres à chaque bout, la barre était à l'état non magnétique, on la retirait du four avec des pinces préalablement chauffées, on ajustait rapidement la règle de laiton, et on plongeait le tout dans le bain d'huile à 200°. Dès que l'équilibre de température était établi, on commençait à mesurer les différences des deux règles, en laissant la température baisser très lentement. On réchauffait ensuite pour constater si l'on était resté dans la partie réversible de la variation. On a pu ainsi, dans quelques séries de mesures, descendre lentement jusqu'à la température du laboratoire. Dans chaque série, on réchauffait à partir d'un certain point de la transformation, afin de mesurer la dilatation correspondant à un état déterminé de l'alliage.

Le diagramme figure 5 représente les variations de la règle d'acier, les températures étant portées en abscisses, les longueurs en ordonnées. Les lignes continues se rapportent à la région observée; les lignes pointillées ont été tracées, par extrapolation, afin de rendre les phénomènes plus évidents.

Lorsque, partant du rouge cerise naissant, on laisse refroidir la barre, elle se contracte suivant la ligne sensiblement droite AB. Vers 130°, la ligne s'incurve vers le haut, la règle s'allonge en se refroidissant, et la grandeur de sa variation atteint bientôt 40 μ par degré. Si, alors, on réchauffe la barre, elle ne revient pas le long de la courbe suivie à température descendante, mais se dilate en suivant une droite telle que CD. Si on recommence à refroidir, la barre revient au point D, et reprend immédiatement sa marche le long de la courbe. On pourra faire suivre ainsi à la barre successivement des droites telles que AB ou CD, ou une courbe d'allongement BDE. A la température de —60°, la règle de l'alliage à 15 % de nickel n'était pas encore complètement transformée. Toutefois, la courbe correspondant au refroidissement progressif indique que la variation était presque achevée. Le coefficient de dilatation correspondant à la dernière transformation est de $10{,}47 \cdot 10^{-6}$.

1. Ch.-Éd. Guillaume, *Recherches sur le nickel et ses alliages* (Archives de Genève, avril et mai 1898; ces notes ont été réunies en une brochure, Paris, Gauthier-Villars).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si nous suivons les lignes, à peu près droites, relatives aux divers réchauffements de la règle, nous voyons qu'elles ne sont pas loin de converger au même point qui est, autant que l'on en puisse juger, situé un peu au-dessus du point supérieur de la transformation. Il est probable que les droites de dilatation aboutissent à une courbe peu étendue, le long de laquelle se produit la transformation progressive supérieure. Le passage à l'état non magnétique a lieu ainsi avec une variation de volume très faible.

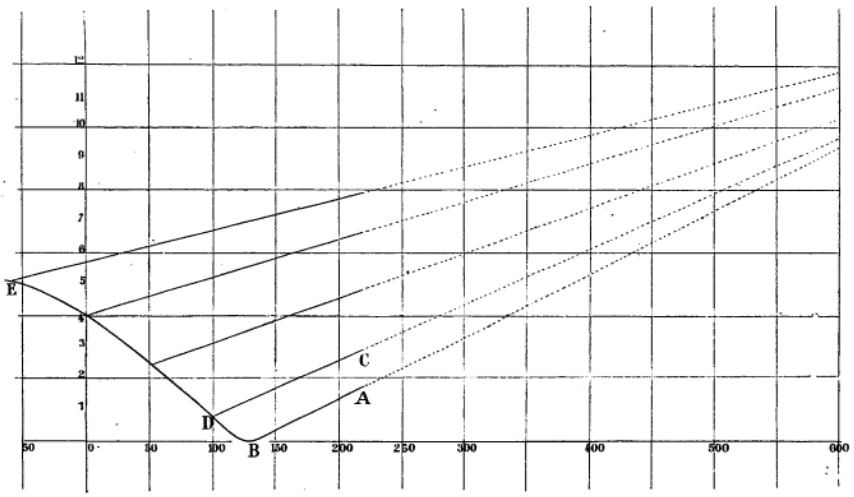


Fig. 5.

Tandis que, après le refroidissement, la barre suit toujours la moins inclinée des droites, dont elle a atteint la partie inférieure le long de la courbe directrice, après un réchauffement jusqu'à la transformation supérieure, elle redescend par la droite la plus inclinée dont elle a atteint la limite supérieure.

Les retards de transformation mentionnés à propos du magnétisme s'observent aisément pour les variations du volume. Ainsi, lorsqu'une barre à 24 % de nickel, refroidie d'abord le long de la courbe de transformation, est ensuite réchauffée de quelques degrés, puis refroidie de nouveau, elle traverse parfois la courbe sans la suivre, et continue à se contracter en prolongeant exactement la droite le long de laquelle elle était revenue au point de départ. On peut descendre ainsi, dans certains cas, d'une quinzaine de degrés sans observer aucune déviation de cette droite. Puis le mouvement se produit, et, en quelques secondes, la règle s'allonge de plusieurs dixièmes de millimètre, atteignant parfois le point où elle serait arrivée en suivant la courbe, mais restant le plus souvent au-dessous.

Chaque alliage irréversible possédant, entre les mêmes limites de températures comprises entre les deux courbes de transformation, une infinité de dilatations comprises entre deux valeurs extrêmes, il est impossible de représenter les dilatations en fonction de la teneur par une courbe unique; mais on peut réaliser une représentation complète par un réseau de courbes dont chacune correspond à une température de transformation déterminée atteinte par les alliages. Faisant abstraction de la transformation supérieure, que tous les alliages ont nécessairement subie complètement dans les chauffes faites en vue du forgeage, nous pouvons supposer qu'ils aient été refroidis jusqu'à une certaine température, et étudiés seulement à des températures plus élevées. Si cette température est, pour tous les alliages, supérieure au début de la deuxième transformation, ils auront tous une dilatation élevée et peu différente d'un alliage à l'autre. A une température plus basse, les alliages les moins riches en nickel se transformeront les premiers, et leur dilatation deviendra plus faible, tandis que celle des autres alliages conservera la même valeur. Plus on augmentera le nickel, plus l'aire des faibles dilatations s'étendra vers la droite, et si l'on amène tous les alliages à 0°, les faibles dilatations s'étendront jusqu'au voisinage de 20 %, et les dilatations caractéristiques d'un état faiblement magnétique seront limitées à une région très peu étendue. Si, enfin, on amène les alliages à des températures très basses, ils arriveront à la transformation complète, et toute anomalie de dilatation disparaîtra.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure 6 peut donner une idée du phénomène. Au début, toutes les courbes se confondent en AB, à la fin en CD. Entre ces deux températures extrêmes, on rencontre un groupe d'alliages en voie de transformation, et dont le retour à l'état magnétique est d'autant plus avancé qu'ils contiennent moins de nickel. C'est à ces alliages que correspondent les courbes θ_1, θ_2, θ_3..., qui aboutissent aux courbes correspondant aux deux états extrêmes, et qui indiquent la dilatation des alliages amenés tous préalablement aux températures θ_1, etc.

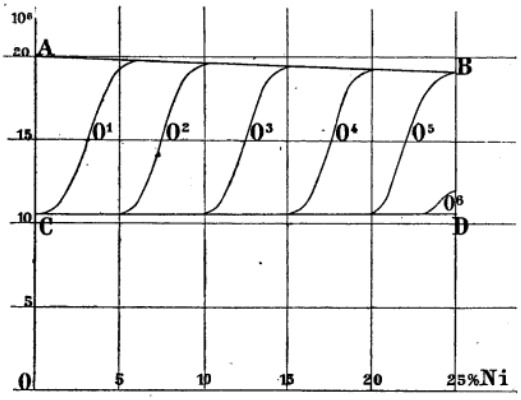


Fig. 6.

On ne peut donner une formule unique de dilatation aux températures ordinaires que pour des alliages à faible teneur en nickel, au maximum de l'état magnétique à ces températures, ou pour des alliages n'atteignant le début de ces transformations qu'à des températures très basses. Voici un exemple de la première catégorie :

Alliage à 5 % de nickel :

$$\alpha = (10{,}529 + 0{,}0058\,\theta)\,10^{-6}$$

et deux de la seconde :

16,2 Ni + 2,5 Cr. pour 100	$\alpha = (19{,}496 + 0{,}0043\,\theta)\,10^{-6}$
21,2 Ni + 3,0 Cr. —	$\alpha = (18{,}180 + 0{,}0043\,\theta)\,10^{-6}$.

Le premier des alliages chromés est plus dilatable que les laitons ordinaires, le deuxième est analogue à celui qu'avait étudié M. Benoît.

Alliages réversibles.

Le tableau suivant contient une partie des formules de dilatation établies, pour les alliages réversibles, à l'aide du comparateur, entre 0° et 38°.

TENEUR POUR 100 Ni	COEFFICIENTS DE LA DILATATION MOYENNE ENTRE 0 ET θ°(¹).
—	
26.2	$(13{,}105 + 0{,}021\,23\,\theta)\,10^{-6}$
27,9	$(11{,}288 + 0{,}028\,89\,\theta)$ —
28,7	$(10{,}387 + 0{,}030\,04\,\theta)$ —
30,4	$(4{,}570 + 0{,}011\,94\,\theta)$ —
31,4	$(3{,}395 + 0{,}008\,85\,\theta)$ —
34,6	$(1{,}373 + 0{,}002\,37\,\theta)$ —
35,6	$(0{,}877 + 0{,}001\,27\,\theta)$ —
37,3	$(3{,}457 - 0{,}006\,47\,\theta)$ —
39,4	$(5{,}357 - 0{,}004\,48\,\theta)$ —
43,0	$(7{,}452 - 0{,}003\,12\,\theta)$ —
44,4	$(8{,}508 - 0{,}002\,51\,\theta)$ —
48,3	$(9{,}843 + 0{,}000\,13\,\theta)$ —
100 (²)	$(12{,}514 + 0{,}006\,74\,\theta)$ —
34,8 + 1,5 Cr.	$(3{,}580 + 0{,}001\,32\,\theta)$ —
35,7 + 1,7 Cr.	$(3{,}373 + 0{,}001\,65\,\theta)$ —
36,4 + 0,9 Cr.	$(4{,}433 - 0{,}003\,92\,\theta)$ —

1. Échelle du thermomètre à hydrogène
2. Nickel pur du commerce; moyenne de plusieurs échantillons.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces formules montrent que les alliages réversibles possèdent une dilatation qui varie dans de très larges limites suivant leur teneur en nickel. Les plus voisins de la première catégorie se dilatent un peu plus que le nickel, puis le terme principal de la formule diminue rapidement et passe, non loin de 28 %, au-dessous de la valeur que lui assignerait la loi des mélanges. A partir de cette teneur, et jusqu'au delà de 45 %, nous avons une anomalie négative de dilatation dont le minimum se produit entre 35 et 36 %. *Les alliages de cette teneur peuvent posséder une dilatation dix fois plus faible que celle du platine, et plus de vingt fois plus faible que celle du laiton.*

Le deuxième terme de la formule présente aussi une marche singulière. Très fort pour les premiers alliages, il passe par une valeur maxima entre 28 et 29 %, puis diminue, devient même négatif près des alliages les moins dilatables, et remonte ensuite vers zéro. La courbe qui représente les valeurs de ce deuxième terme en fonction de la teneur coupe l'axe des abscisses en deux points, l'un près de 36 %, l'autre vers 48 %; ces deux points correspondent à deux alliages dont la dilatation est une fonction linéaire de la température, au moins entre les limites des expériences faites au comparateur.

Les trois derniers alliages montrent que le chrome augmente la dilatation; il en est de même du manganèse, et les nombres du tableau ne sont applicables qu'à des alliages sans chrome, et avec de faibles proportions de manganèse (0,5 % au maximum).

J'ajouterai que les relations entre les teneurs et les dilatations ne sont pas absolues. La dilatation n'est pas une fonction de la teneur seulement; elle varie avec le plus ou moins de dureté des alliages, et peut prendre des valeurs sensiblement plus faibles que les plus basses du tableau. Mais les recherches dans cette direction ne sont pas achevées, et il est superflu d'en donner le détail.

Les mesures faites par comparaison avec la barre de laiton, et qui ont atteint, pour la plupart des règles, des températures supérieures à 220°, ont montré que la loi de dilatation des alliages trouvée au comparateur est susceptible d'être extrapolée jusqu'au voisinage du point à partir duquel la diminution du magnétisme devient très lente. En cet endroit, la dilatation augmente rapidement et atteint, une cinquantaine de degrés plus haut, une nouvelle valeur correspondant à l'alliage entièrement dépourvu de magnétisme. Les allongements en fonction de la température sont représentés au début par une ligne à peu près droite et faiblement ascendante OA (fig. 7), aboutissant à une courbe fortement concave vers le haut AB, qui se termine elle-même dans une nouvelle droite BC. Les deux segments approximativement rectilignes sont tangents à la courbe à ses deux extrémités.

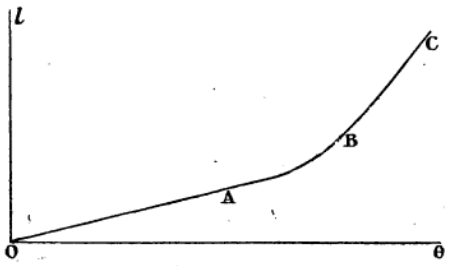


Fig. 7.

Le diagramme des dérivées de cette première figure se compose de trois droites, dont deux, faiblement inclinées, sont reliées par la troisième possédant une forte inclinaison.

Les figures 8 et 9 représentent l'ensemble des relations trouvées. Le premier diagramme contient les dilatations vraies en fonction des teneurs pour les températures de 0°, 50°, 100°, 150° et 200°. Le point de croisement des quatre premières courbes correspond au premier alliage à dilatation linéaire. On voit, en outre, que l'écartement des courbes varie beaucoup d'un point à un autre. Un écartement considérable correspond à la région de forte augmentation de la dilatation dans les limites de température auxquelles les courbes se rapportent.

Le second diagramme, dans lequel, pour simplifier, un petit nombre seulement d'alliages ont été portés, montre le passage graduel de la région de variation de gauche à droite à mesure que la teneur en nickel s'élève. Les alliages les moins dilatables, réservés

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour d'autres expériences, n'ont pas été étudiés jusqu'ici à des températures élevées. Pour les alliages contenant 39 et 44 % de nickel, la région de variation se trouve hors des limites du diagramme.

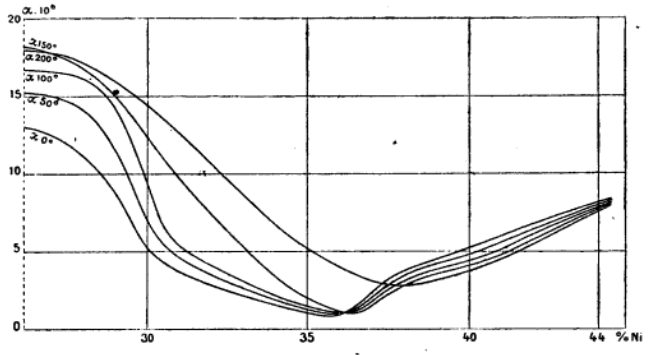


Fig. 8.

Voici quelques-unes des formules représentant les dilatations de divers alliages dans les régions étudiées.

TENEUR EN NICKEL POUR 100.	LIMITES.	DILATATIONS VRAIES A θ^0.	
30,4	0° à 110°	$[4{,}570 + 0{,}0235\ (\theta - 0)]$	10^{-6}
	110 à 164	$[7{,}15 + 0{,}104\ (\theta - 110)]$	—
	164 à 220	$]12{,}60 + 0{,}008\ (\theta - 164)]$	—
31,4	0 à 122	$[3{,}395 + 0{,}015\ (\theta - 0)]$	—
	122 à 182	$[5{,}25 + 0{,}128\ (\theta - 122)]$	—
	182 à 220	$[13{,}00 + 0{,}036\ (\theta - 182)]$	—
34,6	0 à 142	$[1{,}373 + 0{,}00474\ (\theta - 0)]$	—
	142 à 220	$[2{,}05 + 0{,}065\ (\theta - 142)]$	—
37,3	0 à 150	$[3{,}457 - 0{,}0072\ (\theta - 0)]$	—
	150 à 220	$[2{,}37 + 0{,}011\ (\theta - 150)]$	—

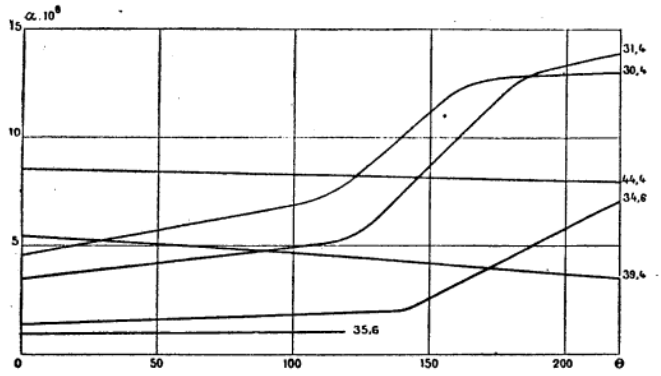


Fig. 9.

Ce qui vient d'être dit explique la singulière variation du deuxième terme des formules trouvées au comparateur. Aux températures pour lesquelles ces formules ont été établies, les premiers alliages se trouvent dans la dernière partie de leur transformation magnétique, à laquelle correspond la portion fortement concave de la courbe des allongements.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DÉFORMATIONS PERMANENTES ET RÉSIDUELLES. — ACTION DU RECUIT

Les déformations résiduelles des alliages irréversibles, en dehors des modifications considérables des dimensions accompagnant les transformations, ont été très peu étudiées jusqu'ici. On sait seulement qu'un échantillon complètement transformé à température basse revient un peu en arrière lorsqu'on le chauffe à une température bien inférieure à celle qui produit son retour à l'état non magnétique. Ce retour est donc précédé, à une grande distance, d'une légère tendance à la transformation qui se produit lentement, dans des limites étroites, et disparaît dans la même proportion lorsqu'on revient à des températures plus basses. Cette variation secondaire, qui n'a pas été encore complètement caractérisée dans les alliages irréversibles, est probablement de même nature que celle qu'on observe dans les alliages réversibles. Cette dernière a été, au contraire, étudiée avec détail, notamment dans les alliages les moins dilatables, pour l'emploi rationnel desquels il est essentiel de la connaître parfaitement.

Ces variations de dimensions sont généralement de très peu d'amplitude, et il est nécessaire d'appliquer à leur mesure les procédés les plus précis; la lenteur de la plupart de ces mouvements oblige, le plus souvent, à les suivre pendant un temps très long. Des mesures nombreuses ont permis de fixer très complètement leur nature.

Comme le verre, ces alliages tendent, à toute température, vers un état déterminé, qui est atteint après un temps plus ou moins long, suivant la température actuelle et l'état antérieur de l'alliage.

Une barre, refroidie à l'air après le forgeage, et maintenue à température constante, tend à s'allonger, et son mouvement est d'autant plus rapide que sa température est plus élevée, au moins si l'on se limite, aux températures inférieures, à celle de perte totale du magnétisme. Lorsqu'une barre a atteint sa longueur définitive à une température déterminée, elle recommence à s'allonger si on l'amène à une température plus basse. Si l'on revient à la température précédente, elle se raccourcit et tend à reprendre la longueur à laquelle elle s'était arrêtée. A toute température, la vitesse est diminuée par un recuit préalable à une température peu supérieure à celle de l'observation. Ainsi, une règle de l'alliage le moins dilatable n'ayant subi aucun recuit après le forgeage éprouve, à la température ordinaire, une variation de 0$^{\mu}$,1 par jour pour 1 mètre de longueur. Mais, si la barre a subi une série de recuits à des températures décroissantes, pour finir par un séjour prolongé à 40°, la variation au début n'est plus que de 0$^{\mu}$,04[1].

J'ai résumé, ci-après, les mesures faites sur une règle de l'alliage le moins dilatable, exposée à la température du laboratoire, après avoir subi des recuits prolongés à des températures graduellement décroissantes de 150° à 40°. Les mesures ont toujours été faites au voisinage de 15°, et réduites à la même température. A l'exception du second, les nombres du tableau sont des moyennes de deux ou trois séries de mesures faites à des jours différents.

TEMPÉRATURES.	TEMPS.	VALEURS.
11°	10 jours	+ 0μ,5
11°	33 —	+ 1 ,8
11° - 18°	74 —	+ 2 ,4
18° - 20°	118 —	+ 3 ,0
20° - 14°	176 —	+ 4 ,6
14° - 8°	245 —	+ 5 ,6
6° - 8°	300 —	+ 5 ,8
[6° - 8°	334 —	+ 6 ,5
8° - 9°	376 —	+ 6 ,1
9° - 15°	455 —	+ 5 ,8
15° - 20°	531 —	+ 6 ,2
20° - 10°	598 —	+ 7 ,3
10° - 6° - 8° - 4° - 6°	680 —	+ 8 ,1
6° - 10°	746 —	+ 7 ,9
10° - 15°	785 —	+ 7 ,5
6°	1097 —	+ 9 ,2

1. Voir Ch.-Éd. Guillaume, Procès-verbaux du Comité international des Poids et Mesures, sessions de 1897 et 1899.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'examen de ces nombres, et mieux encore celui de la courbe qui les représente en fonction du temps (fig. 10), montre que la règle s'est allongée progressivement, suivant une fonction ayant le caractère d'une exponentielle. La courbe présente, il est vrai, une irrégularité bien accentuée dans la seconde année; mais, si l'on rapproche cette perturbation de la variation de la température, représentée par la courbe pointillée, on voit que le raccourcissement de la règle correspond à l'élévation de la température ambiante, conformément aux lois énoncées précédemment.

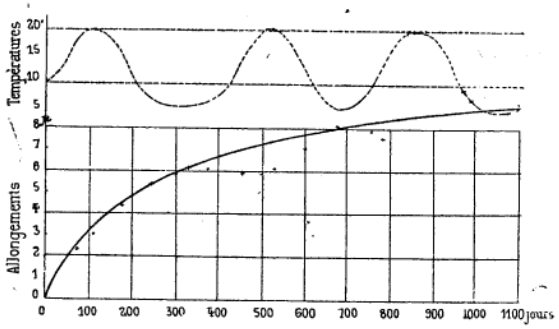


Fig. 10.

Les barres étirées à froid subissent des variations dont les lois sont plus complexes. Le premier recuit à 100° produit d'abord un allongement de la règle; puis, au bout d'un temps variant entre quelques heures et une cinquantaine d'heures, la règle commence à se raccourcir, et ce mouvement de contraction est sensible pendant environ 200 heures. Si, à ce moment, la barre est ramenée à une température plus basse, on n'observe plus qu'un allongement dont l'allure est identique à celle des variations que subit une règle simplement forgée et recuite ultérieurement à 100°. En aucun cas, je n'ai observé de raccourcissement d'une règle étirée, ultérieurement à la première contraction à 100°, même si cette contraction n'avait pas été complète. Il semble donc qu'un recuit à 100° protège contre toute variation aux températures inférieures en ce qui concerne les tensions mécaniques, alors que les variations propres aux aciers au nickel recommencent à toute température inférieure à celle du dernier recuit. Cette propriété des variations résiduelles nous montre qu'il existe deux ordres distincts de déformations : les unes propres à chaque alliage, et indépendantes du traitement mécanique qu'il a subi, les autres, au contraire, ne dépendant que du traitement mécanique.

J'ai d'ailleurs observé, sur des barres de nickel pur, des variations résiduelles de la deuxième espèce, tandis qu'il m'a été impossible d'observer la moindre trace des variations de première espèce. Une barre étirée, ayant subi une variation sensible par le recuit à 100°, conservait une longueur constante à toute température inférieure, quelle que fût la durée de ce recuit supplémentaire.

Les variations sont d'autant plus faibles qu'on s'éloigne davantage de la température de perte totale du magnétisme; ainsi, les aciers au nickel à 44 % de nickel n'éprouvent, en barres forgées, que des variations très faibles; en barres étirées, au contraire, les contractions dépassent 100$^{\mu}$ par mètre dans un recuit prolongé à 100°; les recuits ultérieurs à des températures plus basses ne font plus subir aux barres que des variations insignifiantes.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Modules d'élasticité.

Il existe deux séries étendues de recherches relatives à cette propriété des aciers au nickel. La première a été exécutée par une commission[1] instituée par la Société d'en-

1. Membres de la Commission : MM. Frank, Freund, von Helmholtz, Hoppe, Hausding, Heinecke, Holborn, Kirchner, Ruoll, Rosmann, Röpsel, Lœwenherz, Martens, Siemens, Wedding.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

couragement pour l'Industrie, de Berlin; la seconde a été faite par moi sur des alliages préparés à Imphy.

La commission allemande s'était proposé d'opérer sur des alliages aussi purs que possible, mais, après des essais infructueux, elle modifia son projet, et fit incorporer aux alliages les quantités de corps étrangers strictement nécessaires à leur traitement métallurgique [1].

On prépara une quarantaine d'alliages par groupes de trois, de teneurs très voisinés, et l'on scia, dans les lingots, des éprouvettes destinées aux essais mécaniques. Le module d'élasticité fut déterminé par traction directe.

Les moyennes des teneurs et des modules correspondants sont données dans le tableau suivant :

Ni pour 100.	Modules en tonnes par mm².	Ni pour 100.	Modules en tonnes par mm².
0,05	21,9	7,84	19,3
0,91	20,9	15,60	16,2
2,05	19,9	29,78	12,3
3,01	20,1	59,60	14,5
3,98	20,2	93,52	17,6
4,92	19,9	98,56	16,9

Dans mes expériences, la barre à examiner, placée sur deux rouleaux, supportait en son milieu un plateau que l'on chargeait de poids croissants. On mesurait, à l'aide de trois cathétomètres, la flèche et l'écrasement des supports. Les mesures ont été faites d'abord sur les règles brutes, de 23 à 24 millimètres au côté, forgées à chaud, pour des distances des points de support égales à $0^m,9$ et $1^m,1$ et dans deux positions rectangulaires des barres. Les efforts fléchissants ont atteint 70 kilogrammes. La plupart des mesures ont été répétées sur les barres rabotées, exactement rectangulaires.

Les résultats de ces mesures sont consignés dans le tableau suivant :

Alliages.	Modules d'élasticité en tonnes par mm².	Alliages.	Modules d'élasticité en tonnes par mm².
5 p. 100 Ni.	21,7	37,2 [4] —	14,6
15 —	19,1	39,4 —	15,1
19 —	17,7	44,3 [4] —	16,3
24,1 non magnétique	19,3	100 —	21,6
24,1 magnétique [2]	17,4		
26,2 p. 100 Ni.	18,5	12,2 + 1 Cr.	19,0
27,9 —	18,1	16,2 + 2,5 Cr.	19,6
30,4 —	16,0	16,8 + 1 Cr.	18,3
31,4 —	15,5	34,8 + 1,5 Cr.	15,5
34,6 —	15,4	35,7 + 1,7 Cr.	15,7
35,2 [3] —	14,9	36,4 + 0,9 Cr.	15,7

La comparaison de ces tableaux, ou un coup d'œil jeté sur le diagramme dans lequel ils sont traduits (fig. 11), montre une différence systématique assez considérable entre les résultats de la commission allemande et les miens, et qui, par la comparaison des résultats individuels, ne s'expliquent pas par des erreurs fortuites des mesures.

La méthode des flexions n'est pas à l'abri de tout reproche théorique, lorsqu'elle est appliquée à de grandes déformations; mais ce n'était pas le cas de mes expériences, où les déformations étaient très faibles.

La méthode des tractions correspond mieux à la définition directe de la quantité à déterminer; cependant, on peut imaginer diverses causes d'abaissement apparent du module. Si, par exemple, l'éprouvette est fissurée, la section que l'on mesure est moindre que la

1. Le cobalt, introduit par le nickel, variait proportionnellement à celui-ci, atteignant 1 % dans le nickel lui-même; Mn, Al, Cu, Mg, Si, ne dépassent jamais 0,1 %.

2. La transformation ne paraissait pas complète.

3. Moyenne de treize règles.

4. Moyenne de deux règles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

section agissante, et le module trouvé est trop petit. Si les tractions sont trop fortes, on dépasse les limites de l'allongement proportionnel, et le résultat doit être faussé dans le même sens [1]. Il se peut que les quantités trop faibles de manganèse incorporées aux alliages de la Commission n'aient pas assuré leur parfaite homogénéité, et que la première cause d'erreur se soit trouvée effectivement réalisée. On pourrait penser aussi que les alliages d'Imphy, contenant des quantités plus considérables de corps étrangers, et notamment de carbone, aient eu réellement un module vrai plus élevé que celui des alliages de la Commission.

Abstraction faite de cette divergence systématique, on voit que les deux séries de mesures montrent, d'une façon concordante, que le module des aciers au nickel est plus bas que celui des constituants; il s'abaisse assez régulièrement dans les deux sens, et atteint, dans la région du minimum, une valeur qui est d'un tiers environ inférieure au module de l'acier ou du nickel.

Mes mesures ont montré en outre deux faits curieux :

1° Le passage de l'état non magnétique à l'état magnétique abaisse le module d'élasticité. Ce fait ne pouvait être constaté aisément que sur un alliage susceptible de posséder les deux états à la température ordinaire ou à des températures peu supérieures. Il est extrêmement difficile, en effet, de déterminer exactement des déformations produites par un procédé mécanique lorsque la température de l'échantillon est mal connue et n'est pas uniforme. Dans ce dernier cas, les torsions dues au défaut d'uniformité rendent les résultats méconnaissables. Il est néanmoins infiniment probable que tous les alliages irréversibles possèdent la même propriété à toute température où ils peuvent exister sous les deux états. Ce changement est corrélatif de la variation irréversible du volume, c'est-à-dire des distances auxquelles s'exercent les forces moléculaires. Chacun de ces alliages doit posséder une infinité de modules différents, compris entre deux limites compatibles avec ses conditions d'existence à la température considérée. On sera donc conduit à employer, pour représenter les modules, un réseau analogue à celui qui nous a servi à figurer les dilatations.

Si l'on s'en tient aux données expérimentales, on pourra bifurquer, vers 20 %, la courbe des modules; l'une des parties, correspondant à l'état non magnétique, remonte, tandis que l'autre, relative au même état de l'alliage que celui des précédents, continue exactement leur courbe.

2° Lorsqu'on passe aux alliages réversibles, on trouve d'abord une branche de courbe qui se raccorde certainement avec l'une des courbes du réseau des irréversibles; il semble que le raccordement se fasse à peu près avec les alliages possédant à la même température, le même état magnétique, mais il faudrait de nouvelles expériences pour mettre ce fait hors de doute.

On voit bien nettement, en revanche, que, dès que la région réversible est atteinte, le module baisse rapidement, passe par un minimum non loin de 36 %, et se relève lentement pour les plus fortes teneurs en nickel. Bien que les expériences faites sur le module soient moins précises que celles de la dilatation, et que les variations soient beaucoup moins accentuées, l'existence de ce maximum et de ce minimum relatifs ne font pas le moindre doute. Ils correspondent assez exactement au maximum et au minimum de la dilatation (fig. 11).

L'addition de chrome élève le module, pour toutes les teneurs examinées jusqu'ici.

La variation du module avec la température présente aussi une marche singulière, mise en évidence par de nombreuses expériences faites en commun avec M. Paul Perret [2], à la suite de la découverte, faite par lui, du fait que l'alliage le moins dilatable possède une variation positive avec la température. On peut énoncer en gros le résultat de nos recherches en disant que, dans la région où le module est en excès, sa variation est négative; dans celle où il est en défaut, elle est positive, de telle sorte qu'aux températures élevées, l'anomalie tend à disparaître.

Nos recherches étaient déjà en cours, lorsque M. Thury publia le résultat d'une expé-

1. La valeur très faible trouvée pour le « nickel pur » semble donner raison à cette idée; pour ce métal non forgé, la limite élastique est atteinte pour de très petites déformations.

2. Ces recherches n'ont pas encore été publiées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rience semblable à celle qui nous avait servi de point de départ; il avait retrouvé, d'une manière indépendante, et à une date très peu postérieure, ce même fait, entièrement nouveau, de la variation positive d'un module en fonction de la température.

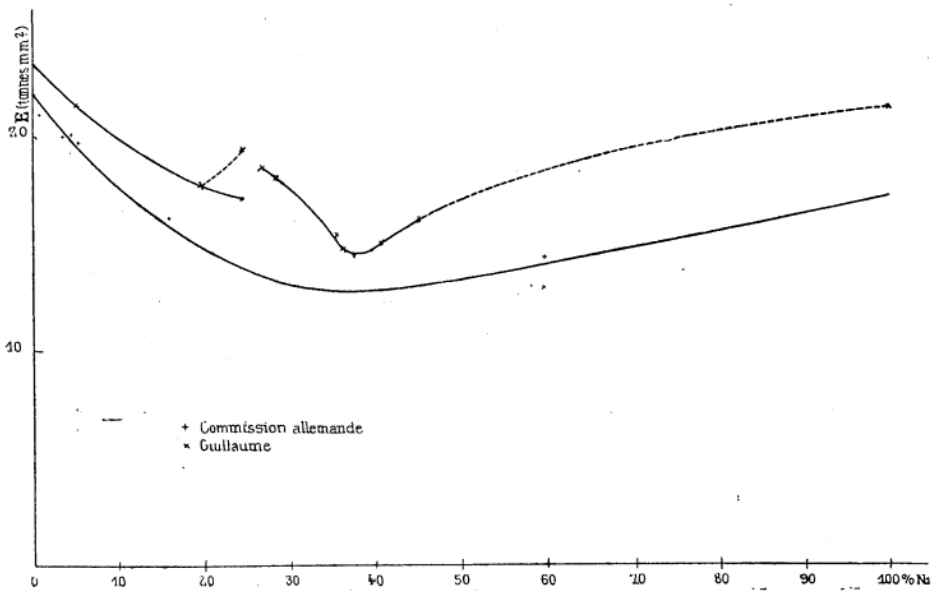


Fig. 11.

Limite élastique, charge de rupture, allongement.

La limite élastique des aciers au nickel des deux catégories peut différer dans de très larges limites suivant le traitement qu'ils ont subi. La transformation magnétique des irréversibles est toujours accompagnée, comme l'a déjà montré Hopkinson, d'une élévation très considérable de cette limite. J'ai vérifié ce résultat et trouvé qu'un fil de l'alliage à 24 % enroulé en spirale, et chauffé au rouge est à peu près au même état élastique que le laiton recuit. Refroidi ensuite dans l'acide carbonique, il possède des qualités peu différentes de celles d'un ressort d'acier trempé.

Le travail mécanique du métal, qui le fait passer à l'état magnétique, produit, sur l'élasticité, le même effet que le froid. Il peut en résulter de graves inconvénients dans la construction des pièces de machine qui, à la température ordinaire, sont près de leur région de transformation. Le travail à l'outil ou à l'étampe, s'il est énergique, durcit très rapidement l'alliage en le transformant dans les parties qui subissent les efforts les plus considérables, et les pièces terminées, qui se composaient au début d'un métal unique, peuvent être finalement constituées par des métaux possédant des propriétés très différentes au point de vue de la dilatation, de la limite élastique, etc. Si le passage d'une région à l'autre est brusque, il constitue une zone de facile rupture, qui peut entraîner des accidents.

Les alliages contenant très peu de nickel se comportent, vis-à-vis de la trempe, à peu près comme les aciers ordinaires; mais, à mesure que les points de transformation s'agglomèrent davantage et que la transformation globale s'abaisse, le phénomène se modifie, et la trempe a une action durcissante de moins en moins prononcée. Finalement, pour une teneur en nickel assez peu élevée, cette action est inappréciable. Pour de plus fortes teneurs, la trempe semble adoucir les alliages.

Les alliages réversibles sans exception sont adoucis par la trempe. L'écrouissage les durcit au contraire dans une large mesure. A ce double point de vue, on ne peut les comparer mieux qu'au laiton.

On peut aussi durcir les alliages des deux catégories par une addition de chrome. Dans les réversibles, l'effet semble être d'augmenter seulement la dureté, en élevant la limite

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

élastique d'une façon très appréciable, et le module d'une quantité mesurable, comme nous l'avons vu. Dans les irréversibles, l'effet est double. Tout en étant, d'une part, le même que dans les réversibles, ce métal abaisse la limite de transfprmation d'une quantité pouvant atteindre plusieurs centaines de degrés, et rend ces alliages, en conséquence, beaucoup plus insensibles aux transformations par les procédés mécaniques. Il permet d'assurer la parfaite homogénéité des pièces travaillées, même après un écrouissage intense par étampage, emboutissage ou tréfilage.

Les recherches les plus importantes, parmi celles dont les résultats ont été publiés, concernant les propriétés qui nous occupent, sont celles de la Commission allemande, de M. Hadfield et des aciéries d'Imphy.

Le tableau suivant contient les données publiées par la Commission allemande.

TENEUR EN NICKEL POUR 100.	KILOGRAMMES PAR MILLIMÈTRE CARRÉ.			ALLONGEMENT DE RUPTURE POUR 100 MESURÉ A PARTIR DE LA SURFACE ROMPUE SUR	
	LIMITE D'ÉLASTICITÉ PROPORTIONNELLE	LIMITE APPARENTE D'ÉLASTICITÉ.	CHARGE DE RUPTURE.	25 MM.	25 MM.
0,05	6,7	15,6	33,9	34,3	27,9
0,91	6,8	16,3	33,0	29,1	24,1
2,05	10,2	20,2	37,0	26,1	22,7
3,01	16,1	24,0	40,6	23,4	20,1
3,98	16,6	26,9	40,6	20,1	17,6
4,92	19,6	32,5	44,6	12,9	10,8
7,84	22,8	44,2	56,2	11,1	9,6
15,60	16,0	»	41,0	0,9	0,6
29,78	6,4	13,6	9,9	2,8	2,2
59,60	6,0	12,5	37,8	37,9	36,1
93,52	4,0	10,8	33,2	20,1	19,0
98,56	3,6	9,1	30,5	18,8	17,1

Les faits les plus saillants qui ressortent de l'examen de ce tableau sont l'abaissement rapide de l'allongement à la rupture, constaté aussi dans d'autres essais, et la charge de rupture extraordinairement basse de l'alliage à 30 %. Cet alliage, de la catégorie réversible, est doux, et devrait, par conséquent, posséder un allongement assez considérable; mais la coïncidence d'un allongement très faible avec une rupture facile semble confirmer l'opinion exprimée à propos du module, et suivant laquelle cet alliage était probablement craquelé. L'allongement pour 60 % de nickel est remarquable.

Les alliages de M. Hadfield contenaient environ 0,2 % de carbone, et des quantités de manganèse variant entre 0,65 et 1,08 %. Les résultats de ses essais mécaniques sont donnés dans le tableau suivant (page 201) :

On retrouve ici l'abaissement rapide de l'allongement à mesure de l'augmentation du nickel. Le passage des irréversibles aux réversibles est signalé par une diminution de la charge de rupture, et une augmentation considérable de l'allongement. Il convient de remarquer toutefois que la diminution de la charge est due en majeure partie à la réduction de la surface, les charges étant rapportées à l'aire primitive. En réalité, la résistance de l'alliage, rapportée à une même section, est assez peu différente pour les deux catégories, dans les alliages des teneurs voisines. La limite élastique s'abaisse, comme on devait s'y attendre, en même temps que l'allongement à la rupture s'élève. Plusieurs de ces alliages, dans lesquels une charge de rupture considérable accompagne un grand allongement sont tout à fait remarquables. Les alliages à 30 % de nickel ont donné à la fois une charge de rupture et un allongement beaucoup plus élevés que ceux de la Commission allemande.

Ces résultats, connus en partie des aciéries de Montataire, d'Imphy, du Creusot, de Saint-Chamond, de Cockerill, des Marais, à Saint-Chinon, Saint-Jacques, Montluçon, qui toutes avaient fabriqué des alliages de diverses teneurs en nickel, étaient déjà très encourageants.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

NICKEL pour 100.	LIMITE ÉLASTIQUE kg/mm².		CHARGE DE RUPTURE kg/mm².		ALLONGEMENT pour 100 sur 51 mm.		RÉDUCTION DE SURFACE pour 100.	
	NON RECUIT.	RECUIT.	NON RECUIT.	RECUIT.	NON RECUIT.	RECUIT.	NON RECUIT.	RECUIT.
0,27.	29,8	31,4	49,5	44,0	35,6	37,0	55,9	52,1
0,51.	32,2	33,8	47,1	42,4	36,8	41,0	62,0	63,7
0,95.	40,0	32,2	52,6	42,4	31,1	41,8	53,9	63,4
1,92.	40,8	34,5	54,2	48,7	33,9	36,2	55,2	53,7
3,82.	44,0	39,2	58,1	51,8	30,8	35,8	54,2	55,6
5,81.	44,7	44,7	64,4	58,1	27,6	33,1	40,2	51,6
7,65.	49,5	47,9	77,7	71,4	26,6	26,0	42,7	40,9
9,51.	66-74	51,0	134,2	88,7	9,3	2,5	18,1	2,0
11,39.	86-110	71-78	147,6	140,5	12,0	11,8	24,4	26,1
15,48.	78-86	barre rompue	147,6	106,8	3,2	1,1	2,5	0,7
19,64.	74,6	70,6	142,9	137,4	6,9	5,7	6,4	4,7
24,51.	51,0	39,2	120,9	123,2	13,6	14,8	14,0 environ	8,6
29,07.	39,2	25,1	60,4	58,1	32,9	48,4	44,0	51,6
49,65.	..	23,6	..	57,3	..	49,0	..	53,1

On chercha, notamment à Imphy, à les améliorer encore[1]. On essaya, d'abord, une addition de chrome à des aciers de diverses teneurs en nickel, et l'on obtint ainsi des alliages généralement trop durs pour pouvoir être travaillés. On continua par des additions croissantes de chrome à des aciers d'une composition à peu près uniforme, contenant un peu moins de 25 % de nickel. On obtint ainsi, jusqu'au delà de 2 % de chrome, des alliages dont les qualités mécaniques allèrent en s'améliorant, comme le montre le résumé suivant :

ACIERS D'IMPHY.

NICKEL.	CHROME.	CARBONE.	MANGANÈSE.	LIMITE ÉLASTIQUE kg/mm².	CHARGE DE RUPTURE kg/mm².	ALLONGEMENT pour 100.	OBSERVATIONS.
24,72	»	0,61	0,24(*)	»	85	43	recuit.
				»	80,7	43	trempé.
24,15	0,41	0,45	0,41	»	77,1	52	recuit.
24,86	1,42	0,53	0,32 (*)	36	82,5	55	recuit.
				34,5	79,5	59	trempé.
24,96	2,88	0,76	0,36 (*)	»	99,6	29	recuit.
				»	90,2	55	recuit deux fois.
				»	91,9	52	recuit et trempé.
20,06	3,16	0,59	0,94(**)	»	80	28	naturel.
				»	77	43	trempé.

(*) Coulées faites au creuset. — (**) Coulée faite au four Martin.

1. Voir l'important mémoire de M. Abraham : *Étude sur certains aciers spéciaux* (*Annales des Mines*, t. XIV, p. 225-347, 1898).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce dernier alliage, introduit dans l'industrie par les aciéries d'Imphy sous la désignation d'acier spécial NC4, doit à ses qualités remarquables des emplois nombreux, malgré son prix élevé. Il se travaille bien à la forge ou au laminoir à chaud; son grand allongement à la rupture permet aussi de le travailler à froid, et sa limite élastique relativement élevée a conduit à en faire des ressorts satisfaisants beaucoup moins fragiles que les ressorts trempés.

Les recuits successifs permettent d'obtenir, pour certains alliages de la même catégorie, des allongements extraordinaires : ainsi, une éprouvette de 100 millimètres d'un alliage à 24,15 % de nickel et 0,41 % de chrome a été allongée de 30 millimètres, puis recuite, puis allongée de 30 millimètres, et ainsi de suite jusqu'au dixième recuit, après lequel elle a donné encore 42 % d'allongement, ce qui a conduit à un allongement total de 242 %.

CONCLUSIONS

Nous avons vu, par les expériences de M. Osmond, que l'on peut passer, par degrés insensibles, des aciers ordinaires aux aciers contenant de fortes proportions de nickel, par le rapprochement et la fusion finale en un seul, des points 2 et 3 de transformation du carbone, et l'exagération considérable des phénomènes accompagnant le double point. On pourrait en conclure que la présence du nickel ne fait qu'abaisser le point de transformation du carbone, supprimant même la transformation Ar1, et exagérant les autres. Le développement de chaleur en ce point est, d'ailleurs, intimement lié au changement de volume. Pendant un intervalle considérable, le fer et le nickel associés se contractent, en effet, beaucoup plus qu'ils ne le font aux mêmes températures lorsqu'ils sont isolés; puis, pendant la transformation, ils reviennent au volume qu'ils devraient occuper, à la température finale, si leur contraction avait été normale. Le retard dans leur changement allotropique, auquel correspond sans doute un changement dans la chaleur spécifique, s'accompagne d'un dégagement de chaleur d'autant plus grand que ce changement est plus retardé.

S'il est logique d'attribuer le rôle principal au carbone, tant que la teneur en nickel est faible, ce dernier jouant le rôle secondaire de retardateur, il ne semble pas que la même théorie puisse encore s'appliquer à des alliages contenant de très faibles traces de carbone, et des teneurs en nickel supérieures à 20 %. Ici, les transformations sont particulièrement nettes, et l'intervalle de retard dépasse 500 degrés. Le carbone, au contraire, d'après les recherches de M. Osmond, et les travaux plus étendus de M. Dumas, est un simple retardateur, et c'est le nickel qui joue le rôle principal. Il semble donc que l'on soit autorisé à établir une théorie indépendante des ferro-nickels, à laquelle viendra se souder la théorie des aciers-nickels, par addition de la théorie des aciers. La première ou la seconde sera prépondérante, suivant les teneurs respectives en nickel et en carbone. On pourra même établir, d'une façon indépendante, la théorie des ferro-chromes et des ferro-manganèses, qui ne sera probablement pas très différente de celle des ferro-nickels, et servira à expliquer le rôle des faibles additions de chrome et de manganèse.

On pourrait, pour fermer le cycle, réaliser des ferro-cobalts, de manière à grouper d'abord tous les éléments de la famille magnétique avec le principal d'entre eux. On sait, en effet, que le chrome et le manganèse, tout en n'étant pas sensiblement magnétiques aux températures ordinaires, le sont probablement aux températures très basses, et communiquent à leurs sels des propriétés analogues à celles que l'on constate dans les sels de fer, de nickel ou de cobalt. Partant de l'autre extrémité, on pourrait aussi étudier les alliages du nickel avec tous les autres métaux du groupe.

Toutes les anomalies déjà mises en lumière sont intimement liées aux transformations magnétiques. Or, il semble certain que l'apparition du magnétisme est due à un groupement moléculaire particulier, s'effectuant avec dégagement de chaleur. Lorsque le fer ou le nickel peuvent être amenés aux températures ordinaires sans atteindre l'état magnétique, c'est que la présence d'un corps voisin a empêché ce groupement, en retenant la molécule dans sa forme primitive.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsqu'il s'agit de ferro-nickels purs, il semble logique d'admettre que le retard réciproque que s'imposent les constituants provient de leur affinité, et de l'existence d'une molécule complexe fer-nickel, se formant grâce à la presque égalité des volumes moléculaires; le fer et le nickel sont alors combinés dans le sens chimique du mot, ou simplement polymérisés par échanges, à cause de leur grande similitude chimique. Les mêmes retards constatés au refroidissement se retrouvent à l'échauffement, puisque le nickel conserve l'état magnétique au-dessus de sa température de transformation normale. On ne peut donc pas dire qu'il soit, dans l'alliage, comme à l'état libre, et que les ferro-nickels magnétiques soient de simples mélanges sans aucun lien entre les constituants. Mais il ne serait pas illogique d'admettre que le retard constaté est dû essentiellement à ce que les molécules de nickel enrobées dans un excès de fer ne peuvent pas éprouver, à la température ordinaire de leur transformation, les variations de volume qui accompagnent le changement[1].

Sous ces réserves, on peut dire, comme première approximation, que les ferro-nickels irréversibles sont, à l'état non magnétique, analogues à des combinaisons de fer et de nickel, tandis qu'à l'état magnétique, ils sont des mélanges des mêmes corps. Les phénomènes accompagnant le passage sont analogues à ceux que l'on observe dans une double décomposition. Toutefois, comme la formation des molécules intégrales fer et nickel aux dépens de la molécule ferro-nickel amène à un produit final d'une nature chimique très analogue au produit précédent, les phénomènes sont moins intenses que dans la plupart des doubles décompositions de nature incontestablement chimique.

Dans les alliages réversibles, les mêmes phénomènes se passent d'une manière continue, à toute température, de telle sorte que toute variation infiniment petite de la température est accompagnée d'une variation infiniment petite de l'alliage, égale et de signe contraire dans les deux sens à une quantité infiniment petite du second ordre près. Cette quantité correspond au phénomène résiduel qui est fonction du temps.

Ici encore, l'accroissement graduel du magnétisme est accompagné d'une augmentation du volume moléculaire moyen, ce qui explique la diminution de la contraction dès la première apparition du magnétisme, et les contractions faibles dans les alliages, dans les régions des températures où le phénomène est le plus intense.

On pourrait aussi assimiler les ferro-nickels à une solution plutôt qu'à une combinaison. L'abaissement de la région de transformation magnétique serait alors analogue à l'abaissement du point de congélation, que l'on observe dans les solutions salines, ou dans les solutions de métaux formant les alliages eutectiques, c'est-à-dire de plus grande solubilité réciproque.

Le passage à l'état magnétique serait alors assimilable à une deuxième solidification ou à une polymérisation, qui serait retardée par la présence d'un corps étranger. Des recherches récentes de M. Dumas ont montré, en effet, que l'on abaisse le point de transformation du fer ou celui du nickel par des additions d'un grand nombre de corps, tout en laissant le premier irréversible, le second réversible, c'est-à-dire sans changer leur caractère principal. Toutefois, cette transformation est étendue sur un beaucoup plus large espace de température que dans les métaux purs, ce qui montre bien que, quelle que soit l'interprétation du phénomène, on se trouve en présence d'un équilibre variable avec la température.

Si les transformations sont simplement retardées par la présence d'un corps étranger, le dégagement de chaleur qui l'accompagne peut n'être pas sensiblement modifié, tandis que l'on doit observer des phénomènes thermiques d'un caractère différent si les corps en présence sont combinés. Des études calorimétriques complètes des alliages, et la détermination précise du degré d'abaissement des régions de transformation permettraient sans doute de mettre en évidence ou d'infirmer les analogies qu'on peut prévoir entre ces phénomènes et ceux que présentent les dissolutions salines.

1. MM. Ewing et Cowan ont démontré, en effet, que la pression peut modifier la température de transformation du nickel. M. Houllevigue (*Journal de Physique*, 3e série, t. VIII, p. 89, 1899) a tenté de fonder une théorie générale des ferro-nickels uniquement sur des phénomènes de cet ordre. Mais cette théorie, fort ingénieuse, semble incompatible avec certains faits observés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La théorie de ces phénomènes, une fois éclaircie, faciliterait singulièrement l'étude des aciers et c'est à ce point de vue surtout qu'elle est digne d'attirer l'attention du Congrès. L'introduction de nouvelles variables dans un problème déjà très compliqué peut paraître, il est vrai, un mauvais procédé d'investigation. Mais, dans notre cas particulier, les modifications qu'introduisent les nouveaux éléments modifient les phénomènes au point d'en rendre l'étude beaucoup plus facile, puisqu'elles ont pour effet de ramener aux températures ordinaires des transformations qui ne se produisent en général qu'à des températures élevées.

Les modifications lentes du volume des aciers-nickels que l'on peut suivre pendant des années à la température du laboratoire sont d'un ordre de grandeur tel qu'elles auraient toujours échappé à l'observation si elles ne se produisaient qu'à une grande distance de cette température. Or, ce phénomène, si peu apparent qu'il soit, donne, par sa vitesse et son amplitude, un document de grande valeur pour l'établissement d'une théorie. Ce seul fait suffirait à montrer l'intérêt que présenterait, pour la métallurgie et l'étude des transformations, l'emploi de méthodes de mesures de grande précision.

CH.-ED. GUILLAUME.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

XI

MÉTALLURGIE

ET

PROPRIÉTÉS DE L'ACIER AU NICKEL

COMMUNICATION

Présentée par M. D.-H. BROWNE

DE LA CANADIAN COPPER C° (CLEVELAND, OHIO)

ET

M. H.-I.-J. PORTER

DE LA BETHLEHEM STEEL C° (SOUTH BETHLEHEM, PA.)

CHAPITRE I

MÉTALLURGIE DE L'ACIER AU NICKEL

Un instinct naturel et commercial pousse le métallurgiste à passer de temps en temps une revue du passé, à faire l'inventaire de ses progrès et à envisager l'opportunité de persister dans sa manière d'opérer. Chaque progrès en métallurgie est obtenu au prix d'une rupture avec les anciennes méthodes et chaque pas en avant est accompagné d'accidents coûteux et d'échecs décourageants. Nous nous étonnons de constater chez la plupart des consommateurs d'acier une disposition à n'entrer dans une nouvelle voie que lorsqu'elle a été entièrement débarrassée de tout obstacle. Le chemin du pionnier n'est jamais un chemin commode.

Il y a une vingtaine d'années, les grandes usines de laminage ont changé leur production et fourni de l'acier à la place de fer; les consommateurs apprirent qu'il y avait sur le marché un nouveau métal plus résistant et plus ductile que le fer.

A cette époque, comme aujourd'hui encore, le producteur était en avance sur le consommateur. Les métallurgistes étaient en mesure de fournir de l'acier aux clients qui, auparavant, employaient uniquement le fer, mais le consommateur n'était pas persuadé des avantages qu'offrait l'acier. Bien des clients qui auraient volontiers employé le nouveau métal en étaient détournés par les difficultés qu'ils rencontraient dans le travail à la forge et le laminage de l'acier. A cette époque, les forges ne possédaient que des marteaux-pilons légers qui pouvaient fournir de grosses pièces en fer forgé, mais qui ne pouvaient servir à forger de gros lingots d'acier.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La plupart des accidents qui se produisirent au début de l'emploi de l'acier pour la fabrication des arbres et autres pièces de forge eurent pour cause le manque de machines-outils convenables pour ce travail. Les marteaux-pilons légers, alors en usage, donnaient à la surface des lingots une texture fibreuse, mais conservaient au centre de la masse l'état brut et cristallin qu'il présente au sortir de la lingotière. Les pièces de forge ainsi obtenues étaient cassantes et, dans la plupart des cas, on attribuait la cause des accidents à l'emploi de l'acier, que l'on considérait comme impropre à cette fabrication. Les livres d'il y a vingt et même dix ans sont pleins de commentaires sur la « trahison » de l'acier. Après une lutte prolongée entre le métallurgiste, qui savait que l'acier était bon, et le consommateur, qui le trouvait mauvais, on trouva la cause de cette divergence d'opinion, et la faute en fut attribuée aux méthodes de traitement et d'usinage de l'acier. L'introduction de gros marteaux-pilons et du forgeage à la presse hydraulique élimina la plupart des difficultés rencontrées jusque-là, et aujourd'hui on produit à chaud des pièces de forge en acier que le producteur et le consommateur sont unanimes à déclarer supérieures aux pièces similaires en fer. Dans ces dernières années, il s'est produit une lutte analogue entre le producteur et le consommateur à propos de l'introduction d'un nouveau métal que les métallurgistes en tête du progrès déclarent constituer un grand perfectionnement par rapport à l'acier au carbone. Il y a dix ans que l'acier au nickel est connu du commerce, mais, grâce à l'esprit conservateur des consommateurs d'acier, il n'y a seulement que cinq ans que ce métal est d'un usage général. Beaucoup de consommateurs qui désirent profiter des avantages que procure l'emploi de l'acier au nickel ignorent complètement la manière dont il convient de traiter ce métal. Quand on essaie de manipuler l'acier au nickel en suivant les méthodes routinières qui ont donné jusqu'ici de bons résultats avec l'acier au carbone, il arrive souvent qu'on obtient une pièce de forge ne donnant pas satisfaction et, naturellement, on condamne le métal et non la méthode de traitement.

Nous sommes persuadés qu'un court abrégé indiquant les qualités de l'acier au nickel et les méthodes reconnues les meilleures pour son traitement sera le bienvenu auprès des consommateurs d'acier qui désirent obtenir les meilleurs résultats et profiter des succès comme des insuccès des autres.

L'acier au nickel fourni par les usines métallurgiques pour la fabrication des arbres et des pièces de forge contient environ 3,25 % de nickel et environ 0,25 à 0,35 de carbone. Ce métal est obtenu dans des fours à réverbère dans lesquels le nickel, introduit à l'état métallique ou à l'état d'oxyde en même temps que la fonte, est réduit par l'oxydation du carbone contenu dans la fonte.

Si l'on considère une éprouvette d'acier au nickel sortant du four, on verra que la cassure du barreau d'essai est tout à fait différente de celle de l'acier au carbone. L'acier au carbone présente une cassure à grains dont l'aspect permet au métallurgiste de dire très exactement quelle est la teneur en carbone du métal. Une éprouvette d'acier au nickel montre après rupture une structure cristalline très marquée qui rappelle un peu celle de la fonte moulée en coquille; de longs cristaux à texture fibreuse convergent de l'extérieur vers le centre du barreau d'essai. Il est donc impossible de comparer la cassure de l'acier au nickel à celle de l'acier ordinaire. Si cependant l'ouvrier chargé de la conduite du four prend des éprouvettes à intervalles réguliers et met en parallèle les cassures des barreaux avec leur teneur en carbone déterminée par l'analyse, il constatera que l'aspect des cassures change à mesure que la teneur en carbone diminue. L'expérience seule peut renseigner sur l'aspect exact, mais une fois cette donnée connue, le fondeur peut la considérer comme un critérium certain de la teneur en carbone.

Le lingot doit avoir un diamètre supérieur de 50 % au moins et une longueur supérieure de 10 à 25 % aux dimensions correspondantes de la pièce de forge qu'on veut en tirer.

L'acier n'est pas un métal homogène, mais consiste en un mélange de divers carbures de fer avec certaines proportions de carbone, de manganèse et d'autres corps; et, comme tous ces éléments présentent des poids spécifiques et des points de fusion différents, le lingot ne se solidifiera pas en une masse de composition uniforme. C'est ce qui produit le phénomène connu sous le nom de ségrégation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand la masse se refroidit, les impuretés tendent à se rassembler au centre de la partie supérieure du lingot où le métal reste le plus longtemps fluide; il se produit ainsi au centre un noyau d'impuretés. C'est pour cette raison que les meilleurs fabricants d'acier ont adopté une méthode qui consiste à percer au centre les lingots destinés à la fabrication des arbres ou des tiges de piston. Cet artifice fait disparaître le noyau d'impuretés et augmente la résistance de l'arbre par rapport à son poids. Soit qu'il donne naissance à un alliage distinct

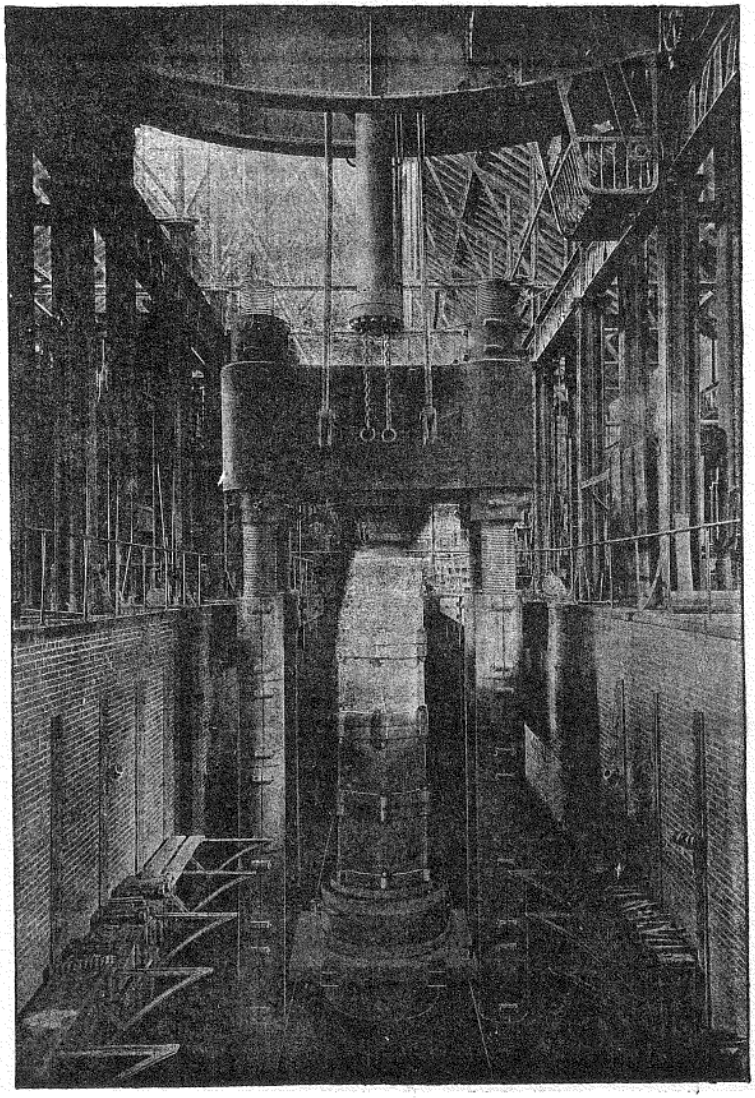


Fig. 1. — Presse de 7000 tonnes pour comprimer l'acier, des aciéries de Bethlehem : la lingotière est représentée sous la presse.

avec le carbone, soit qu'il remplisse en quelque sorte les interstices qui existent dans la structure du lingot, le nickel tend à prévenir la ségrégation.

Un lingot fabriqué aux aciéries de Bethlehem en 1897, et destiné à fournir une frette de canon de 406 millimètres se chargeant par la culasse, a été étudié attentivement dans toutes ses parties afin de déterminer le degré de ségrégation qu'il présentait. Ce lingot avait $1^m,683$ de diamètre et $3^m,683$ de longueur. On fit une chute de 457 millimètres à la base et une de 127 millimètres au sommet, ce qui laissait au lingot une longueur de $3^m,010$. On perça aux deux extrémités du lingot des trous espacés de 25 millimètres et répartis sur une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

droite allant de la surface extérieure au centre du lingot. Le tableau I donne les résultats des analyses exécutées sur ces échantillons.

TABLEAU I [1]

Ségrégation de l'acier au nickel.

Lingot de 1m,683 de diamètre et de 3m,633 de longueur.

DISTANCE en millimètres A PARTIR DE LA SURFACE EXTÉRIEURE.	PARTIE INFÉRIEURE DU LINGOT.							PARTIE SUPÉRIEURE DU LINGOT.						
	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni
25	0,32	0,80	0,022	0,022				0,31	0,72	0,025	0,030			
50	0,31	0,80	0,028	0,036				0,30	0,72	0,026	0,030			
75	0,29	0,79	0,029	0,036				0,30	0,72	0,028	0,033			
100	0,29	0,79	0,029	0,035	0,163	0,040	3,070	0,30	0,72	0,028	0,032	0,172	0,040	3,070
200	0,28	0,76	0,030	0,036				0,29	0,72	0,029	0,030			
300	0,29	0,74	0,028	0,032				0,29	0,72	0,027	0,030			
400	0,27	0,74	0,029	0,034				0,29	0,73	0,029	0,033			
500	0,27	0,74	0,029	0,035				0,31	0,75	0,035	0,038			
600	0,27	0,73	0,030	0,036				0,34	0,75	0,040	0,050			
725	0,27	0,72	0,027	0,034	0,162	0,042	3,068	0,36	0,76	0,046	0,061	0,170	0,043	3,277

Ce tableau montre que la ségrégation des lingots d'acier au nickel est moindre que celle que l'on constate généralement dans les lingots d'acier au carbone. En enlevant la partie centrale d'un lingot d'acier au nickel, on ne laisse subsister qu'une masse presque chimiquement homogène. Pendant que le lingot refroidit dans la lingotière, la partie extérieure

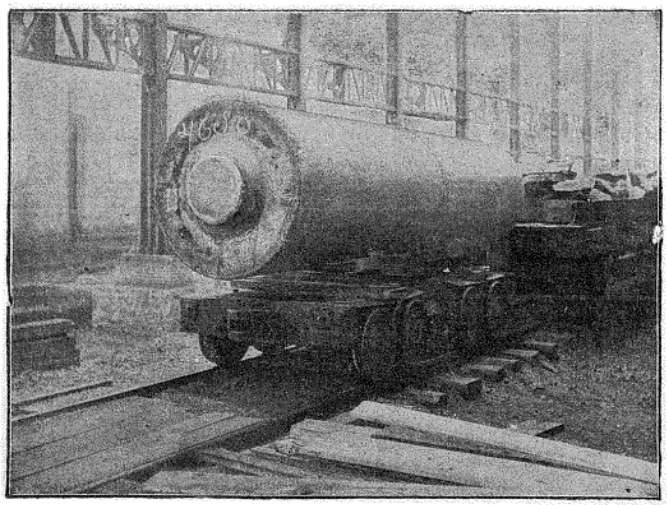


Fig. 2. — Lingot ayant subi une compression à l'état fluide.

a une tendance à se détacher du centre et il tend à se former un vide annulaire. Pour éviter cet inconvénient et pour assurer à l'acier une uniformité physique satisfaisante, on a recours à la compression du lingot encore à l'état fluide. Aux aciéries de Bethlehem, la lingotière placée sur un chariot est conduite sous une presse hydraulique qui exerce sur le métal encore mou une pression de 7000 tonnes. Cette pression chasse, à travers des évents ménagés à cet effet, l'air entraîné lors de la coulée et les gaz qui prennent naissance pendant le refroidissement. Après compression, le lingot débarrassé de son noyau est aussi homo-

1. D'après M. C.-A. Buck, chimiste des aciéries de Bethlehem.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gène qu'il est possible de l'obtenir dans l'état actuel de nos connaissances. La figure 1 représente la presse employée aux Aciéries de Bethlehem pour comprimer les lingots à l'état fluide. La figure 2 représente un lingot que l'on vient de retirer du moule de compression.

Une fois que l'on a obtenu un lingot homogène, la première opération à lui faire subir au cours du forgeage est le réchauffage. Cette opération est délicate et on doit veiller à ce

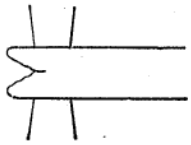


Fig. 3. — Effet du forgeage au moyen d'un marteau-pilon trop léger.

que la chaleur pénètre dans la masse du métal lentement et uniformément. La contraction qui accompagne la solidification produit une tension à l'intérieur du lingot. Si nous introduisons un lingot froid dans un four chaud, nous provoquons une dilatation immédiate de sa surface extérieure qui l'éloigne du centre; il en résulte une tension additionnelle qui s'exerce sur la partie centrale. On détermine ainsi des criques au centre du lingot, et les pièces de forge qui en proviendront seront susceptibles de rompre en service parce qu'elles n'ont pas été convenablement réchauffées. Beaucoup de ruptures peuvent être attribuées au manque de soin apporté à cette opération.

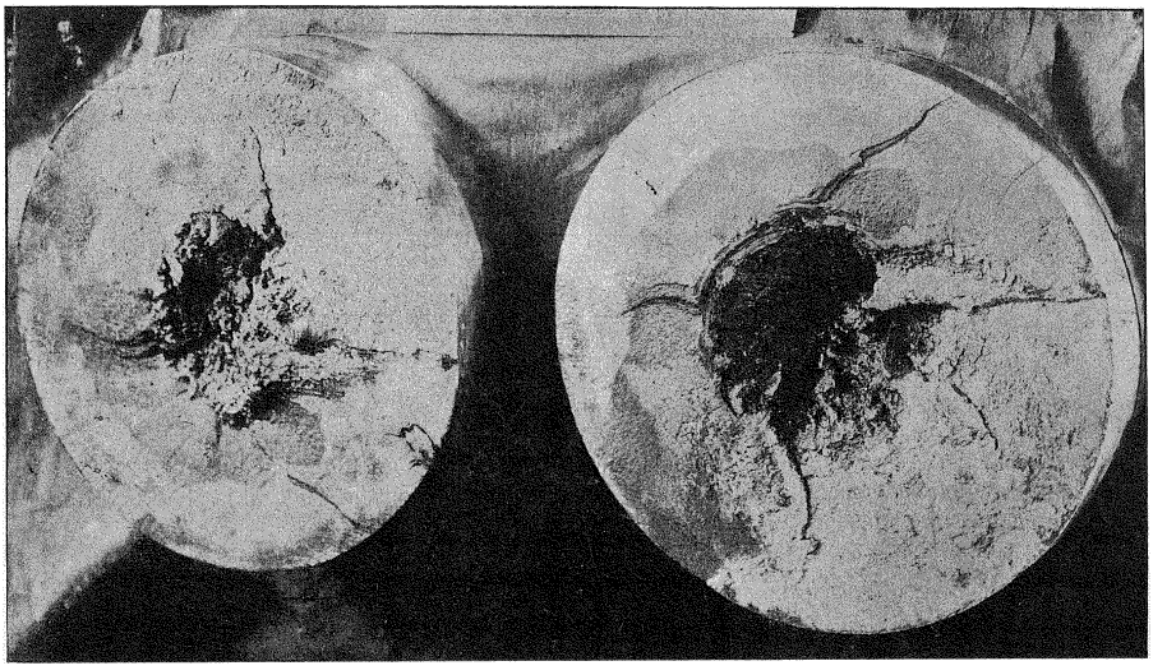


Fig. 4. — Centre creux du lingot initial, agrandi; métal déchiré par le choc superficiel d'un marteau-pilon trop léger. Arbre de 481 millimètres de diamètre en acier forgé au moyen d'un marteau-pilon de 10 tonnes.

Une des premières conditions à remplir pour le forgeage des gros lingots est de disposer d'une presse ou d'un marteau-pilon convenables. Un marteau-pilon léger dépensera inutilement son énergie sur la surface de la pièce à forger; il refoulera le métal du centre vers les extrémités en formant ainsi un creux à chaque extrémité du lingot (fig. 3). Ceci a pour résultat de laisser à la partie centrale du lingot la texture grossière et cristalline qu'elle a au sortir de la lingotière. La figure 4 montre l'effet que peut produire un marteau trop léger.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En 1885, un incident malheureux révéla au public le mauvais effet d'un forgeage défectueux. On avait forgé au moyen d'un marteau-pilon de 10 tonnes, pour en faire un arbre destiné à l'aviso " Dolphin ", de la marine des États-Unis, un lingot de 762 millimètres que l'on avait amené à son diamètre final de 406 millimètres. Après un court service, cet arbre se rompit et la partie rompue fut envoyée à l'Arsenal de Watertown dans le but de découvrir, si possible, la cause de l'accident. On découpa à la partie supérieure de l'arbre des éprouvettes ayant la forme et les dimensions indiquées au bas du diagramme ci-après (fig. 5); ces éprouvettes furent découpées à des distances variables du centre, comme le montre la coupe (fig. 5), et reçurent la marque 3787, accompagnée respectivement de la mention 1, 2, 3 et 4. Les courbes portant ces marques respectives représentent les résultats de ces essais, que l'on peut lire sur la rangée de nombres inférieurs inscrite au-dessous du

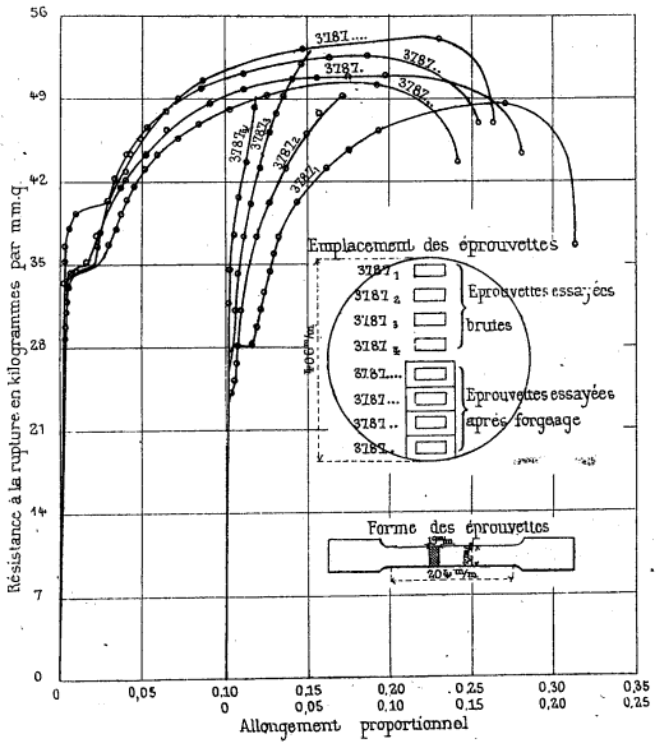


Fig. 5.

diagramme. L'éprouvette la plus voisine de la surface donna un allongement de 21.4 %, la seconde un allongement de 5.5 %, la troisième un allongement de 4.9 %, et la plus voisine du centre un allongement de 2 %.

En d'autres termes, la ductilité ou douceur du métal variait de 21.4 % à 2 % entre la surface et le centre, ce qui montre que le métal voisin de la surface avait seul été travaillé par le marteau-pilon trop léger, tandis que le reste du lingot était resté dans son état primitif. Pour prouver plus explicitement que la rupture de l'arbre était due à ce que le métal avait été insuffisamment forgé et que s'il avait été forgé plus complètement il eût été plus doux, on découpa dans la moitié inférieure de l'arbre des barreaux que l'on marqua 3787., 3787.., 3787..., 3787...., et on les amena par forgeage aux mêmes dimensions que les éprouvettes prises dans la moitié supérieure. En un mot, on fit subir au métal des éprouvettes un travail de forge analogue à celui qu'aurait dû subir le métal de l'arbre lors du premier forgeage du lingot.

On peut lire les résultats de ces essais à la ligne supérieure de nombres inscrite sous le diagramme. Les quatre barreaux donnèrent des allongements respectifs de 25.4, 28.2, 26.4 et 24.1 %, soit une moyenne de 26 %, ce qui démontre d'une manière concluante que la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cause de la rupture du métal n'était pas due à un défaut inhérent au métal, mais seulement à un manque de forgeage au centre du lingot.

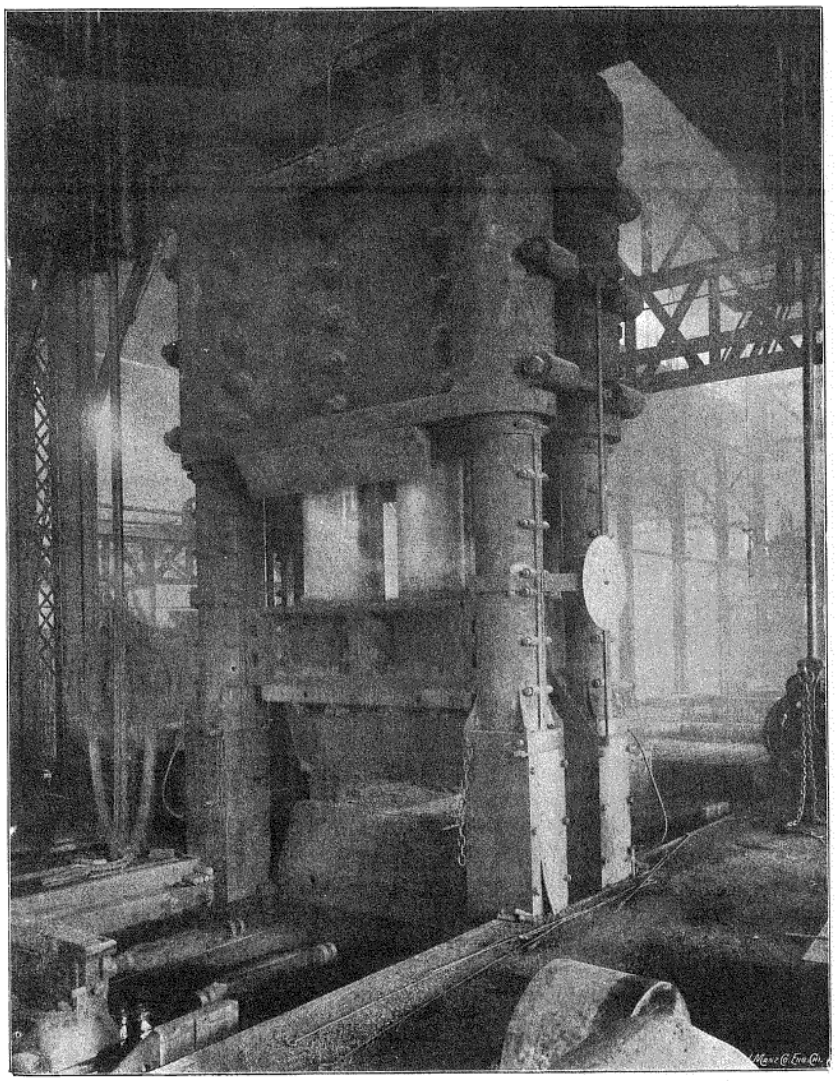


Fig. 6. — Presse hydraulique à forger de 14 000 tonnes des Aciéries de Bethlehem. Cette presse est actionnée par une pompe à vapeur de 15 000 chevaux.

La pression exercée sur une pièce d'acier pour l'amener à une forme voulue serait suffisante comme intensité et comme nature pour pénétrer jusqu'au centre et provoquer un flux de métal à travers la masse. Ce flux de métal demande un certain temps et exige que la pression soit maintenue pendant une période correspondante.

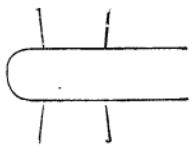


Fig. 7. — Effet sur un lingot du forgeage au moyen d'une presse puissante.

La presse hydraulique remplit parfaitement ces conditions (fig. 6). Le mauvais effet produit par le choc rapide de marteaux-pilons légers a été complètement démontré et il est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

indubitable que leur emploi doit être évité. Sous l'influence du mouvement lent de la presse les molécules du métal peuvent se déplacer facilement et la pression est transmise dans toute la pièce de forge. La figure 7 représente l'extrémité d'arbres forgés à la presse hydraulique. Le centre étant le plus chaud et par conséquent le plus mou est comprimé et prend

Fig. 8. — Tourelle de commandement en acier au nickel du cuirassé *Brooklyn* montrant l'effet de la presse à forger. La pièce représentée brute de forge pèse 35 tonnes. — Diamètre extérieur 2m,381, diamètre intérieur 1m,943, longueur 3m,023.

une forme convexe. La figure 8 montre très clairement cette forme bombée. Un arbre forgé à la presse hydraulique présente dans toutes ses parties une résistance uniforme. Les tableaux suivants représentent les essais physiques effectués sur un arbre-manivelle forgé à la presse hydraulique et destiné au cuirassé " Ohio ".

TABLEAU II [1]

Arbre-manivelle forgé à la presse hydraulique.

	RÉSISTANCE A LA TRACTION	LIMITE ÉLASTIQUE	ALLONGEMENTS	STRICTION
	Kgr. par mm².	Kgr. par mm².	0/0	0/0
Surface externe	66,311	42,063	27,00	54,02
A mi-distance du centre	65,856	42,231	27,00	55,10
Surface externe	66,311	42,063	27,00	55,55
A mi-distance du centre	66,311	41,806	27,00	52,10
Surface externe	63,098	38,500	29,00	59,04
A mi-distance du centre	64,169	39,928	30,00	59,04

Il est nécessaire de réchauffer le métal plusieurs fois pendant le forgeage, et, comme on n'arrive pas à forger deux parties du lingot dans les mêmes conditions de température, on obtient la forme voulue par des chaudes et des forgeages successifs; on détruit ensuite

1. D'après Geo C. Acker, ingénieur aux Aciéries de Bethlehem.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par un recuit les efforts de tension dus au refroidissement. Si l'on étudie la marche du refroidissement d'un lingot d'acier depuis le point de solidification jusqu'au refroidissement complet, on voit que la température baisse régulièrement de la même quantité pour une même période de temps jusqu'à environ 700° à 650°. Ce point (qui dépend de la teneur en

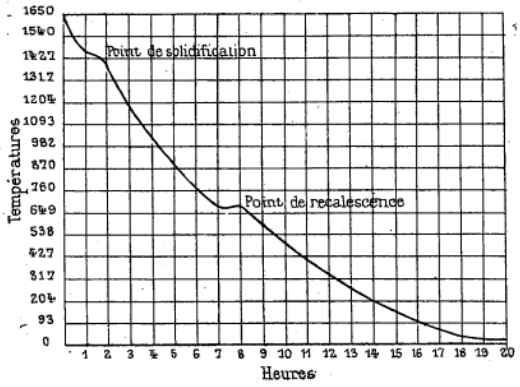


Fig. 9.

carbone) atteint, la température cesse brusquement de baisser, reste stationnaire ou même monte pendant un temps très court, puis le refroidissement reprend la même marche qu'auparavant. Le point où a lieu ce phénomène s'appelle le point de recalescence ; les essais chimiques et physiques nous apprennent qu'il se produit ici un changement dans la structure de l'acier (fig. 9).

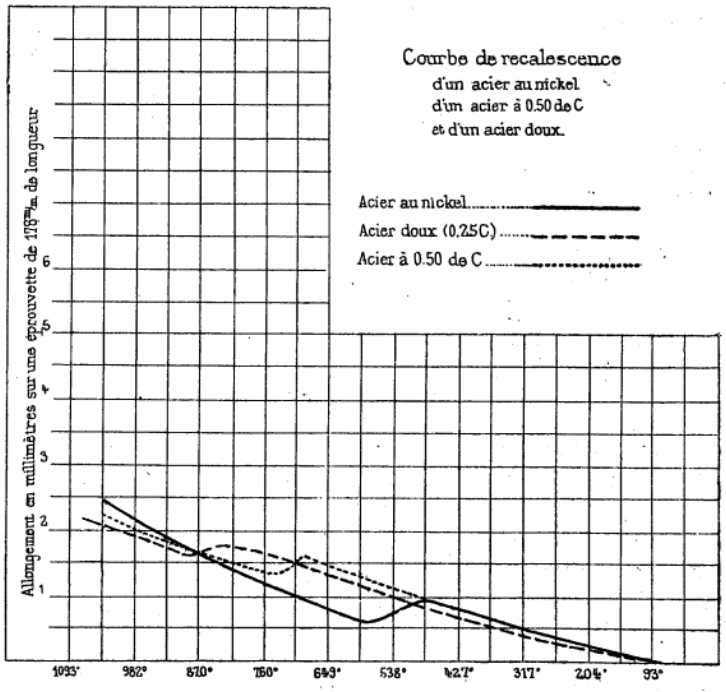


Fig. 10.

L'acier fluide commence à cristalliser au point de solidification, et, plus la marche du refroidissement est lente, plus grands sont les cristaux quand le lingot est froid. Au point de recalescence il semble que la cristallisation s'arrête d'elle-même, et si, après refroidissement, nous réchauffons le lingot à une température inférieure à ce point, la cristallisa-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion n'est pas affectée ; si, au contraire, on réchauffe à une température un peu supérieure au point de recalescence et qu'on laisse refroidir de nouveau, on trouvera que les cristaux sont beaucoup plus petits qu'avant. En fait, on sait que si on chauffe l'acier à une température légèrement supérieure au point de recalescence, on détruit tous les cristaux existants et qu'il se produit à cette température une structure amorphe.

La cristallisation commence dès le début du refroidissement et continue jusqu'à complet refroidissement du lingot. Cependant, comme la période de refroidissement à partir du point de recalescence est comparativement courte, la cristallisation correspondante est peu importante. On comprend facilement que le traitement à chaud, qui peut complètement changer la structure interne du métal, constitue un élément important de la fabrication des pièces de forge en acier.

M. Souther a trouvé que le point de recalescence d'un acier à 0.25 % de carbone est voisin de 870°, tandis que pour un acier à 0.50 de carbone la recalescence se produit à 732°, et pour un acier à 0.25 % de carbone et 50 % de nickel à 568°; l'addition de 0.25 de carbone abaisse le point de recalescence de 114°, tandis que l'addition de 5 % de nickel l'abaisse de 288° (fig. 10).

Il est évident que le nickel a une influence très énergique sur la température critique de l'acier. L'examen fait par M. Osmond d'une série d'aciers fabriqués par M. Hadfield et contenant environ 0.16 de carbone avec des teneurs variables de nickel montre la même influence du nickel sur le point de recalescence. Le tableau suivant donne le point de recalescence pour les différentes qualités d'acier.

TABLEAU III

Recalescence des aciers au nickel.

Qualités d'acier (Analyse).	Température de recalescence.
C = 0,16; Ni = 0	660°
C = 0,19; Ni = 0,27	640°
C = 0,15; Ni = 0,95	620°
C = 0,19; Ni = 5,82	560°

L'addition de 3.82 % de nickel abaisse la température critique de 100°. On ne sait pas au juste ce qui se passe à cette température. Comme le degré de recalescence, c'est-à-dire la durée de la période pendant laquelle la température de refroidissement de l'acier reste stationnaire, est approximativement proportionnel à la teneur en carbone, il est à présumer que la recalescence est produite par la combinaison chimique d'une partie du carbone et du fer pour former un carbure défini, et que la chaleur qui se dégage provient de cette combinaison. D'après les expériences de M. Osmond, la durée de la recalescence paraît approximativement proportionnelle à la teneur en nickel. Ces faits semblent indiquer que le nickel se combine, à la température critique, avec le fer ou avec le carbone et peut-être avec ces deux corps à la fois pour donner un composé chimique défini. Dans le numéro de mars 1897 du *Journal de Chimie analytique et appliquée*, on indiquait que le nickel se combine avec le fer pour former des cristaux d'aspect argenté ayant pour composition $Fe_8 Ni_9$. M. Guillaume a trouvé la formule de ces composés : $Fe_2 N_i$, et $Fe_3 N_i$. On peut par conséquent considérer comme acquis que le nickel se combine au fer pour former des composés cristallisés définis et que cette combinaison a lieu à une température beaucoup plus basse que celle à laquelle le fer et le carbone s'unissent pour former l'acier ordinaire.

Étant donné que le nickel diminue le point de recalescence et que ce point marque la température à laquelle la cristallisation de l'acier prend une forme définitive, il est évident qu'en réchauffant ou en recuisant l'acier, nous devons nous efforcer d'amener le four de réchauffage à une température qui dépasse un peu le point de recalescence, tel qu'il aura été déterminé soigneusement par expérience pour cette qualité d'acier.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On ne peut pas trop insister sur l'importance de ce point, car même dans les usines où l'on connaît bien la sensibilité de l'acier au nickel vis-à-vis du traitement par la chaleur, une simple négligence du chauffeur a donné des résultats désastreux.

L'ingénieur en chef du Matériel et de la Traction d'une Compagnie de chemins de fer des États-Unis disait récemment que les ruptures des tiges de piston en acier au nickel lui causaient beaucoup d'ennuis. Comme plusieurs autres Compagnies de chemins de fer étaient très satisfaites de l'emploi de tiges de piston en même métal, on fit un jour une enquête pour déterminer les causes de ces ruptures ; on s'aperçut que sur douze tiges de piston qui avaient été fournies par les Aciéries de Bethlehem et forgées à la température convenable, pas une ne s'était rompue en service. Les ruptures, au nombre de 35, s'étaient toutes produites pour des pièces fabriquées par une autre forge où l'acier au nickel était traité à la même température que celle qui avait donné jusqu'alors satisfaction pour l'acier ordinaire.

Un arbre forgé non recuit ressemble en quelque sorte à un ressort en acier enfermé à l'intérieur d'un tube de même métal dont la rigidité est suffisante pour empêcher le ressort de prendre sa position naturelle. La pression moléculaire des cristaux qui existent à l'intérieur de l'arbre engendre une force définie qui tend à courber l'arbre, tandis que la dureté de la surface externe du métal empêche cette force d'agir. Si on fait passer un tel arbre sur le tour et qu'on en fasse disparaître les couches superficielles, la tension intérieure pourra agir et l'arbre tendra à se courber. Par conséquent, si l'arbre est livré par la forge complètement terminé, comme c'est souvent le cas, il pourra être soumis en service à un effort inférieur à la limite élastique mais agissant dans le même sens que la tension moléculaire intérieure, de sorte que l'effort total sera supérieur à la limite élastique. Il faut par conséquent supprimer par le recuit les tensions dues au forgeage et débarrasser l'arbre de toute perturbation moléculaire. Comme la combinaison du nickel avec le carbone et le fer produit une perturbation moléculaire plus importante que celle qui correspond à la combinaison du carbone et du fer dans l'acier ordinaire, il est évident qu'un recuit approprié est encore plus nécessaire pour l'acier au nickel que pour l'acier ordinaire.

Le recuit a pour effet d'abaisser la limite élastique par rapport à la résistance à la rupture[1] et d'augmenter la ductilité, c'est-à-dire l'allongement et la striction. La limite élastique d'une pièce de forge en acier ordinaire recuite est généralement égale à la moitié environ de la résistance à la rupture. Dans les pièces de forge en acier au nickel ayant subi un recuit, la limite élastique dépasse de beaucoup la moitié de la résistance à la rupture. Le tableau suivant montre les propriétés physiques moyennes que l'on obtiendrait pour des pièces de forge en acier, les barreaux d'essai ayant 508 millimètres entre repères et 37 millimètres de diamètre; on a supposé la limite élastique déterminée au moyen d'un micromètre électrique.

TABLEAU IV

QUALITÉS D'ACIER (ANALYSE)	RÉSISTANCE A LA TRACTION	LIMITE ÉLASTIQUE	ALLONGEMENTS	STRICTION
	Kilogrammes.	Kilogrammes.	0/0	0/0
C — 0,20 à 0,25 Acier ordinaire recuit.	40,6	20,3	28	35
C — 0,30 à 0,35 Acier ordinaire recuit.	52,5	25,9	23	
C — 0,40 à 0,50 Acier trempé à l'huile, la partie centrale enlevée.	59,5	35,0	22	45
C — 0,25 Ni — 3,15 Acier au nickel recuit. . . .	56,0	35,0	25	45
C — 0,25 Ni — 3,15 Acier trempé à l'huile, la partie centrale enlevée . . .	59,5	38,5	24	45
C — 0,25 Ni — 3,15 Acier trempé à l'huile, le centre percé d'un grand trou	63,0	42,0	22	50

1. *Note du traducteur.* — Il s'agit, dans tout ce qui va suivre, de la résistance à la rupture par traction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Après simple recuit, les pièces en acier forgé présentent généralement des qualités physiques supérieures à celles de l'acier ordinaire après trempe à l'huile. Pour les pièces de forges compliquées dont la forme rend la trempe à l'huile impraticable, l'avantage que l'on obtiendrait en employant dans ce cas l'acier ordinaire trempé à l'huile, peut être obtenu en employant l'acier au nickel et en lui faisant subir un simple recuit au lieu et place de la trempe à l'huile. Si la forme de la pièce de forge permet de la tremper à l'huile l'acier au nickel, forgé avec des marteaux-pilons convenables et trempé à l'huile dans des conditions appropriées, fournira des propriétés physiques supérieures à celles que l'on pourra atteindre en employant tout autre métal actuellement connu. On voit d'après le tableau IV qu'on peut atteindre la résistance à la rupture et la limite élastique élevées, aujourd'hui nécessaires pour les pièces de forge, soit en augmentant la teneur en carbone, jusqu'à environ 0.60 %, soit en maintenant la teneur en carbone faible et en incorporant dans le métal environ 3 % de nickel. Pourquoi alors, peut-on se demander, ne faut-il pas préférer l'acier riche en carbone à l'acier au nickel qui est beaucoup plus cher? Il n'en faut pas chercher bien loin la raison.

Les aciers riches en carbone présentent en effet une résistance à la traction et une limite élastique élevées, mais leur ductilité est très faible. De plus ils sont beaucoup plus durs et beaucoup plus sujets à la ségrégation que les aciers à faible teneur en carbone. Par conséquent, si nous avons à exécuter un arbre en acier à 0.60 de carbone, nous aurons à éliminer un noyau central composé d'impuretés qui s'y seront concentrées et la dureté du métal sera une source de difficultés sérieuses. On ne peut recourir à un lingot creux, car le noyau central cylindrique qui contient les impuretés se transformerait en un anneau. La seule manière d'éliminer ces impuretés est donc d'aléser le lingot après coup. La haute teneur en carbone de l'acier rend cette opération très dispendieuse; il est donc plus économique de maintenir la teneur en carbone aux alentours de 0.25 à 0.30 et d'obtenir l'augmentation de la résistance à la traction par une addition de nickel. La rigidité des aciers riches en carbone les rend difficiles à forger, tandis que les aciers au nickel traités à une température convenable se travaillent facilement au marteau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE II

PROPRIÉTÉS DE L'ACIER AU NICKEL

Les propriétés physiques du nickel métallique parfaitement désoxydé ne diffèrent pas beaucoup de celles du fer pur. Les essais faits dans les usines de la « Canadian Copper C° » ont montré que la résistance à la traction du nickel fondu est d'environ 24.5 kilogrammes par millimètre carré avec un allongement correspondant de 5 %. La résistance à la traction du nickel forgé ou laminé varie de 47 à 56 kilogrammes par millimètre carré, avec un allongement d'environ 45 %.

La seule grande supériorité du nickel sur le fer consiste dans les qualités qu'il acquiert par forgeage. Le fer à peu près exempt de carbone présente pratiquement la même résistance à la traction avant et après forgeage. Le forgeage augmente au contraire beaucoup la résistance à la traction et l'allongement du nickel.

Si on représente par 100 la résistance à la traction, la limite d'élasticité et l'allongement du fer pur et du nickel pur fondus, les résultats donnés par les éprouvettes forgées offrent un contraste marqué.

TABLEAU V[1]

	RÉSISTANCE A LA TRACTION en kgr. par mm².	LIMITE ÉLASTIQUE	ALLONGEMENTS
			%
Fer pur (fondu)	100	100	100
— (forgé)	110	100	290
Nickel pur (fondu)	100	100	100
— (forgé)	200	127	1.000

Ce tableau montre que le forgeage augmente considérablement la résistance à la traction et la ductilité du nickel pur. Les docteurs Wedding et Rudeloff ont montré que l'augmentation de résistance à la traction due au laminage est beaucoup plus grande pour les alliages de fer et de nickel que pour le fer pur et que, de plus, à une augmentation de la teneur en nickel de l'alliage correspond une augmentation de la ductilité due au forgeage.

Les bons effets du forgeage sur les alliages de fer et de nickel et leur plus grande aptitude au traitement par la chaleur expliquent la supériorité de l'acier au nickel quand il s'agit de pièces de forge compliquées. Nous allons étudier successivement les diverses propriétés physiques de l'acier au nickel.

ÉLASTICITÉ

Il ne faut pas confondre l'élasticité avec la limite élastique. Le mot élasticité signifie faculté de résister à la fatigue. Les métaux sont presque des êtres organisés en ce qui concerne leur manière de se comporter quand ils sont soumis à des efforts ; leur endurance ou résistance élastique a beaucoup d'analogie avec la manière dont se comporte le corps humain dans diverses conditions de travail. On peut rompre une éprouvette par un seul effort exercé d'une façon continue et dépassant la limite élastique ou par un certain nombre

1. D'après l'ouvrage d'Hadfield : « Alloys of Iron and Nickel ».

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'efforts discontinus très inférieurs à la limite élastique. La rotation d'un arbre nous fournira un très bon exemple pour expliquer ce qui se passe en ce cas. La force engendrée par la charge due à un volant ou à une hélice calés sur un arbre se déplace rapidement autour de cet arbre dont les molécules sont soumises alternativement à des efforts de tension et de compression. Dans ce cas on peut provoquer la rupture au moyen d'une charge moitié moindre que s'il s'agissait d'un effort exercé dans une direction unique.

De nombreux essais, effectués sur des métaux soumis à des efforts changeant rapidement de sens, ont montré que, si la charge représente une fraction suffisamment faible de la limite élastique, le métal peut supporter un nombre d'efforts illimité en pratique et que, plus la charge sera voisine de la limite élastique, moins il faudra d'efforts répétés pour provoquer la rupture. La faculté que présente un métal de résister à des efforts répétés, dont le sens varie alternativement, et voisins de sa limite élastique, est une très bonne définition de son élasticité ou de son endurance, dans les conditions de travail considérées.

Les essais d'endurance effectués à l'arsenal de Watertown sur des aciers ordinaires et sur des aciers au nickel, de compositions variables, ont pleinement démontré l'influence du carbone et du nickel sur l'endurance du métal.

Les éprouvettes d'essais fabriquées par les Aciéries de Bethlehem étaient toutes soumises à des essais de rotation à raison de 1500 tours par minute, sous une charge qui produisait dans la fibre moyenne un effort maximum de 28 kilogrammes par millimètre carré. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

TABLEAU VI

Endurance d'arbres soumis à des essais de rotation.

COMPOSITION		TRAITEMENT	RÉSISTANCE A LA TRACTION	LIMITE ÉLASTIQUE	ALLONGEMENT SUR	STRICTION	NOMBRE de
CARBONE	NICKEL		en kgr. par mm²	en kgr. par mm²	50 mm. 8		TOURS
0,24	0	Recuit.	49,87	28,39	32,3	59,81	229.300
0,26	3,28	»	56,96	36,05	28,75	61,09	1.847.500
0,24	0	Trempe.	52,01	31,62	33,15	69,93	348.000
0,26	3,28	»	63,45	46,87	26,9	65,04	1.815.000
0,42	0	Recuit.	56,60	31,00	23,0	56,7	225.900
0,42	0	Trempe.	46,13	38,50	26,05	57,22	655.600
0,25	4,51	Recuit.	66,84	43,13	24,8	57,13	2.366.000
0,25	4,51	Trempe.	84,13	71,30	20,8	60,05	3.296.700
0,46	0	Recuit.	66,22	33,64	21,15	47,65	976.600
0,46	0	Trempe.	72,02	42,78	23,05	51,27	1.657.500
0,29	5,66	Recuit.	76,18	56,06	22,5	58,71	4.368.400
0,29	5,66	Trempe.	91,99	82,33	19,65	59,88	3.795.200
0,66	0	Recuit.	86,94	45,64	7,15	17,28	3.689.000
0,66	0	Trempe.	108,44	64,43	13,5	31,48	4.323.000

On voit d'après ces résultats que l'endurance augmente avec les teneurs en carbone et en nickel, et qu'on peut atteindre la même endurance pour un métal soumis à des essais de rotation, soit en augmentant sa teneur en carbone soit en y incorporant une faible quantité de carbone avec addition de nickel. Cependant si cette endurance est obtenue au moyen du carbone seul, elle l'est aux dépens de la ductilité, tandis que l'emploi du nickel permet d'obtenir l'endurance sans sacrifier la ductilité.

Dans le tableau précédent on remarque que deux éprouvettes, l'une contenant 0,66 % de carbone et l'autre 0.29 % de carbone avec 5,66 % de nickel, ont atteint une endurance de 4,300,000 tours, mais l'allongement de l'acier au carbone recuit n'est que de 7 %, tandis

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que l'allongement de l'acier au nickel atteint 22 %. Evidemment l'acier au nickel dont la ductilité est triple de celle de l'acier au carbone, l'endurance étant la même, présente plus de sécurité et se trouve être en même temps beaucoup plus facile à travailler.

Dans aucun cas l'élasticité du métal employé n'a plus d'importance que pour les bâtis de bicyclettes qui sont soumis à des efforts de torsion, d'extension et de compression se succédant rapidement et très irrégulièrement, l'effort disparaissant aussi brusquement qu'il est appliqué. Dans les usines de la « Pope Tube C° », on essaye ordinairement l'acier employé dans la construction des bicyclettes en faisant subir des efforts transversaux aux pièces essayées auxquelles on imprime en même temps un mouvement de rotation rapide. On trouvera dans le chapitre suivant la description de l'appareil employé à cet effet. M. Henry Souther, ancien ingénieur des essais de la « Pope Tube C° », s'exprime comme suit à ce sujet :

« Nous supposerons dans tous les cas que les éprouvettes sont soumises à un recuit, et, par « recuit », j'entends un recuit effectué à la température la plus convenable pour cette qualité d'acier. Nous prendrons comme base un acier à 0,10 % de carbone supportant une charge égale aux deux tiers de sa limite élastique maximum. En supposant que dans ces conditions le barreau d'essai fournisse 100 000 tours, un acier à 0,25 % de carbone atteindra environ 200 000 tours, un acier à 0,5 % de carbone 400 000 tours, et un acier au nickel (0,25 de carbone et 5 % de nickel) environ 1 000 000 de tours ».

L'élasticité d'un métal soumis à un pareil essai, dépendant de l'élévation de la limite élastique qu'il offre quand on le soumet à des efforts de tension et de compression, nous allons étudier successivement ses propriétés à ce double point de vue.

La grande élasticité de l'acier au nickel en a développé l'emploi aux États-Unis pour les supports de selles et les guidons de bicyclettes.

LIMITE ÉLASTIQUE ET RÉSISTANCE A LA TRACTION

Si l'on compare l'acier à 3 % de nickel avec l'acier ordinaire de même qualité, on constate que la présence du nickel augmente la résistance à la traction et la limite élastique. Si l'on divise l'excès de charge en kilogrammes que l'acier peut supporter par mètre cube en plus de la résistance de l'acier ordinaire, par sa teneur en nickel exprimée en centièmes, le quotient exprime ce que nous appellerons le gain de résistance correspondant à une addition d'un pour cent de nickel. Cette définition n'est pas strictement rigoureuse, mais elle nous servira de base de comparaison pour étudier l'influence du nickel sur les diverses qualités d'acier.

D'après les expériences de Rudeloff, l'addition (jusqu'à 5 % de nickel) au fer pur donne pour chaque centième de nickel ajouté une augmentation de $3^{kg},56$ par millimètre carré pour la limite élastique, et de $2^{kg},43$ par millimètre carré pour la résistance à la rupture. Pour les barreaux d'essai forgés en acier au nickel, les gains correspondants sont de $3^{kg},18$ et de $3^{kg},62$.

D'après les essais de M. Hadfield sur des éprouvettes en acier peu carburé, chaque centième de nickel ajouté donne une augmentation de 2^{kg}, 63 pour la limite élastique et pour la résistance à la rupture. Une série d'essais prolongés, effectués dans les usines de la « Canadian Copper C° », a donné comme gains moyens par centième de nickel ajouté : $3^{kg},07$ pour la limite élastique et $2^{kg},67$ pour la résistance à la rupture. Nous avons groupé dans le tableau suivant les résultats obtenus par les divers expérimentateurs.

TABLEAU.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU VII

EXPÉRIMENTATEURS	QUALITÉ D'ACIERS	GAINS CORRESPONDANT A L'INTRODUCTION d'un centième de nickel.	
		LIMITE ÉLASTIQUE	RÉSISTANCE à la traction.
		Kgr. par mm².	Kgr. par mm².
Docteur Rudeloff	Très peu carburé	3,56	2,43
Hadfield	C = 0,15	2,63	2,63
Canadian Copper Cº	C = 0,10 (acier embouti)	3,07	2,67
M. Souther (Pope Tube Cº)	C = 0,25 (acier pour bicyclettes)	2,8	3,5
Beardmore et Allan	C = 0,15 (acier laminé)	3,84	2,46
M. Hart (Aciéries de Bethlehem)	C = 0,20 (acier forgé)	4,00	6,00
— — —	C = 0,30 — —	4,6	4,00
— — —	C = 0,40 — —	5,8	5,00
— — —	C = 0,50 — —	7,4	6,00
MM. Donald (Aciéries Crescent)	C = 1,10 (acier au creuset)	13,27	14,34

L'influence du nickel sur la limite élastique et sur la résistance à la rupture paraît augmenter avec la teneur en carbone, c'est-à-dire qu'avec les aciers riches en carbone il semble qu'on obtienne en ajoutant du nickel un gain supérieur à celui que donnent les aciers pauvres en carbone. Bien que les résultats consignés dans le tableau ci-dessus soient

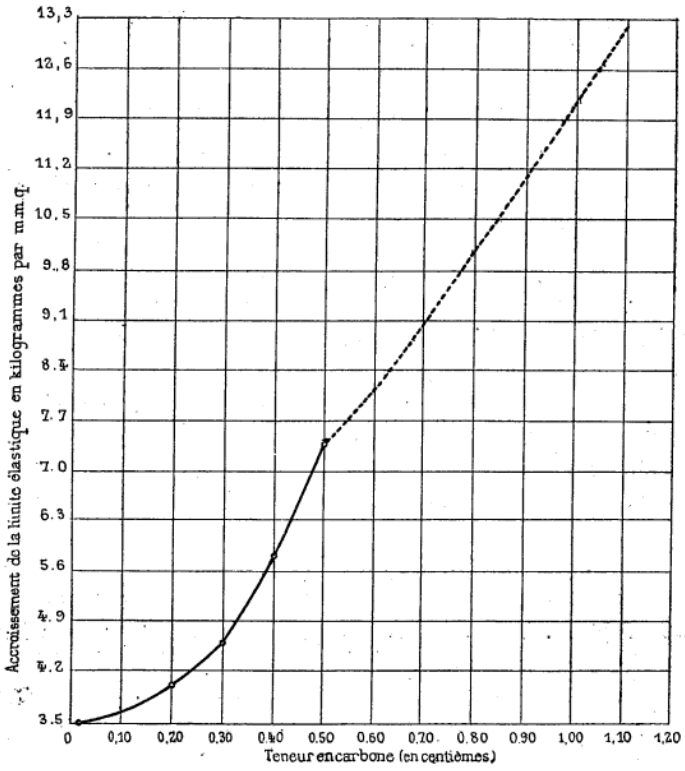


Fig. 11.

trop peu nombreux pour servir de base à des comparaisons rigoureuses, les résultats obtenus par les aciéries de Bethlehem concordent très bien avec ceux des autres aciéries; la courbe établie d'après ces résultats (fig. 11) peut servir de base de comparaison pour les gains dus à chaque centième de nickel ajouté.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DUCTILITÉ

L'acier au nickel présente cette particularité d'allier la ductilité à une limite élastique élevée. Le nickel seul diminue légèrement la ductilité du fer, de sorte que si l'on compare des aciers de même teneur en carbone, l'acier au nickel accuse une légère diminution en ce qui concerne l'allongement et la striction.

Voici les résultats obtenus par J.-G. Eaton avec un acier à 0.25 de carbone recuit.

TENEUR EN CARBONE	TENEUR EN NICKEL	LIMITE ÉLASTIQUE	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	ALLONGEMENT	STRICTION
		Kgr. par mm².	Kgr. par mm².	0/0	0/0
0,25	0	25,5	43,69	26,25	58,5
0,25	3,3	41,65	59,25	24,50	54,0

En comparant des aciers de même teneur en carbone, on voit donc que l'introduction du nickel produit une légère diminution d'allongement et de striction.

Si l'on compare des aciers offrant la même résistance à la traction, l'acier au nickel présente une ductilité supérieure à celle de l'acier au carbone.

TENEUR IN CARBONE	TEN UR EN NICKEL	LIMITE ÉLASTIQUE	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	ALLONGEMENT	STRICTION
		Kgr. par mm².	Kgr. par mm².	0/0	0/0
0,20	3,5	31,5	59,5	26	50
0,40	0	30,1	59,5	25	40

Si l'on considère des tôles de protection pour pont, l'acier ordinaire à 0.45 de carbone donne une résistance à la rupture de 63 kilogrammes par millimètre carré avec 15 % d'allongement (mesuré sur 508 millimètres); l'acier à 0.20 de carbone avec 3 % de nickel donnera 63 kilogrammes de résistance à la rupture par millimètre carré avec un allongement de 20 % (mesuré sur 58mm,8).

D'après M. Davenport, à égalité de résistance à la rupture, le nickel donne une petite augmentation d'allongement et une striction beaucoup plus forte.

Si l'on augmente la teneur en nickel jusqu'à 15 ou 16 %, on constate un accroissement d'élasticité et une diminution d'allongement. Si l'on dépasse 15 %, l'addition de nickel augmente la résistance et la ductilité. Un acier à 27 % de nickel est remarquablement flexible et présente des fibres de nickel : il donne des pliages doubles de ceux de l'acier ordinaire; le métal semble remplir les interstices des fibres comme s'il s'agissait d'écheveaux de lin; on atteint dans ce cas un allongement de 40 % comme le montre le tableau suivant :

	LIMITE ÉLASTIQUE	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	ALLONGEMENT	STRICTION
	kgr. par mm²	kgr. par mm²		
Acier à 27 0/0 de nickel	39,2	80,92	47,75	68,4
—	32,9	70,00	47	61

RAPPORT ENTRE LA LIMITE ÉLASTIQUE ET LA RÉSISTANCE A LA RUPTURE

Tout effort supérieur à la limite élastique de l'acier produisant une déformation permanente, il est évident que la fraction de la résistance du métal comprise entre la limite

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

élastique et la résistance à la rupture n'a presque pas d'importance. Plus la limite élastique est voisine de la résistance à la rupture, plus le métal est d'un emploi avantageux. Ce rapport peut être augmenté, soit en faisant subir à l'acier une trempe à l'huile, soit en y introduisant une certaine quantité de nickel, soit encore en combinant ces deux opérations.

Si l'on considère des éprouvettes recuites en acier ordinaire pauvre en carbone, la limite élastique est égale à la moitié de la résistance à la rupture. Les expériences de M. Rudeloff ont démontré que ce rapport augmente avec la teneur en nickel jusqu'à la teneur de 8 %, comme le montre le tableau suivant.

Rapport entre la limite élastique et la résistance à la rupture des alliages de fer et de nickel.

(RUDELOFF.)

TENEUR EN NICKEL.	RAPPORT ENTRE LA LIMITE ÉLASTIQUE ET LA RÉSISTANCE A LA RUPTURE.
0/0	
0	45
1	49
2	55
3	59
4	66
5	73
8	79

D'après les essais faits par M. Moulan, ingénieur de la Société Cockerill à Seraing (Belgique), sur un alliage de fer pur et de 7.5 % de nickel, le rapport entre la limite élastique et la résistance à la rupture pour le fer doux est égal à 0.55, tandis que pour l'acier à 0,55 de carbone ce rapport est de 0.51; pour un alliage de fer homogène et de 7.5 % de nickel, ce rapport atteint 0.91. Après la trempe à l'huile et recuit à 500° des éprouvettes les rapports étaient devenus 0.65 pour le fer, 0.74 pour l'acier et 0.96 pour le ferro-nickel. Ce rapport élevé entre la limite élastique et la résistance à la rupture a été atteint sans diminution de la ductilité; en effet l'éprouvette de ferro-nickel trempée et recuite a donné un allongement de 12.2 %.

Le tableau suivant donne le rapport de la limite élastique à la résistance à la rupture pour diverses qualités d'acier.

TABLEAU VIII

EXPÉRIMENTATEURS	QUALITÉ D'ACIERS	RAPPORT DE LA LIMITE ÉLASTIQUE à la résistance à la rupture
Colby	Pièces de forge en acier doux recuites	46,4
—	Acier demi dur recuit	46,2
—	Acier au nickel demi dur recuit	58,7
Allan	Acier ordinaire forgé	54,4
—	Acier au nickel forgé	64
—	Acier ordinaire laminé	43,6
—	Acier au nickel laminé	58,3
Aciéries de Bethlehem	Pièce de forge en acier ordinaire (C = 0,32)	50,6
— —	Pièce de forge en acier au nickel (Ni = 3,6 C = 0,32)	64,3
— —	Acier ordinaire recuit	48,3
— —	Acier au nickel recuit	56,2
— —	Acier ordinaire trempé à l'huile	56,2
— —	Acier au nickel trempé à l'huile	66,6

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le rapport élevé entre la limite élastique et la résistance à la rupture permet d'obtenir pour une charge donnée des pièces de forge en acier au nickel plus légères que ne le seraient des pièces de forge en acier ordinaire.

INFLUENCE DU NICKEL SUR LA RÉSISTANCE A LA COMPRESSION

On a étudié la résistance à la compression d'alliages de fer pur dans lequel on avait introduit des quantités variables de nickel. La résistance à la compression directe augmente avec la proportion de nickel introduite dans l'alliage, jusqu'à ce que la teneur en nickel ait atteint un maximum de 16 %; la loi de variation est la même que pour la résistance à la traction, excepté que pour la traction la résistance maxima est atteinte pour une teneur en nickel de 8 %, tandis que pour la compression le maximum correspond à une proportion de 16 % de nickel. Dans des essais comparatifs où des petits barreaux d'alliages étaient soumis au choc d'un mouton très lourd, on a observé les mêmes rapports entre les teneurs en nickel et la résistance à la compression; on a remarqué également que jusqu'à 16 % de nickel, la résistance du barreau à la compression augmente avec le nombre de coups de mouton et que l'augmentation de résistance est également en rapport direct avec la teneur en nickel; le maximum a lieu pour une teneur en nickel de 16 %. En d'autres termes, le nickel semble augmenter l'accroissement de résistance produit par le travail à froid.

M. Hadfield a publié des résultats d'essais de compression exécutés sur des aciers au nickel pauvres en carbone. D'après des essais, les éprouvettes contenant de 11,39 à 15,48 % de nickel ont offert une résistance à la compression extraordinairement élevée. Ces éprouvettes ont subi une diminution de longueur de 1 % sous une charge de 100 tonnes, alors que dans des conditions identiques l'acier pauvre en carbone et exempt de nickel donne une diminution de longueur de 50 %.

TABLEAU IX

Essais à la compression exécutés par M. Hadfield.

MARQUE de L'ÉPROUVETTE	TENEUR en CARBONE	TENEUR en NICKEL	LIMITE ÉLASTIQUE à la COMPRESSION	DIMINUTION de longueur SOUS UNE CHARGE DE 100 T.
	%	%	kgr par mm. q.	%
a	0,19	0,27	1,565	3,356
b	0,14	0,51	1,565	3,556
c	0,13	0,95	1,422	3,485
d	0,14	1,92	1,920	3,342
e	0,19	3,92	1,992	2,916
f	0,18	5,81	2,845	2,631
g	0,17	7,65	2,845	2,347
h	0,16	9,51	4,979	216
i	0,18	11,39	7,112	71
j	0,23	15,48	5,690	71
k	0,19	19,64	5,690	216
l	0,16	24,51	5,556	1,517
m	0,14	29,07	1,707	2,916

M. Hadfield s'exprime ainsi :

« Quelques-uns des résultats obtenus sont remarquables; les éprouvettes *i* et *j* notamment ont donné une résistance à la compression extraordinairement élevée, surtout si l'on considère la faible teneur en carbone des barreaux d'essai. Un détail encore plus curieux est que, malgré leur résistance élevée à la compression, ces aciers sont relativement doux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et peuvent être travaillés à la machine, avec une certaine difficulté cependant. Si l'on considère les alliages de fer et de nickel purs, c'est-à-dire exempts de carbone, ou n'en contenant que de faibles traces, il n'est pas douteux que l'accroissement de résistance à la compression est une propriété très remarquable que paraissent seuls posséder les alliages de nickel et de fer. La résistance à la compression des aciers au nickel n'est évidemment pas due uniquement à leur dureté, comme dans le cas des aciers ordinaires.

RIGIDITÉ DES ACIERS AU NICKEL

Depuis que l'on emploie l'acier au nickel pour la construction des essieux des locomotives lourdes et des wagons à marchandises, il est devenu nécessaire de leur faire subir

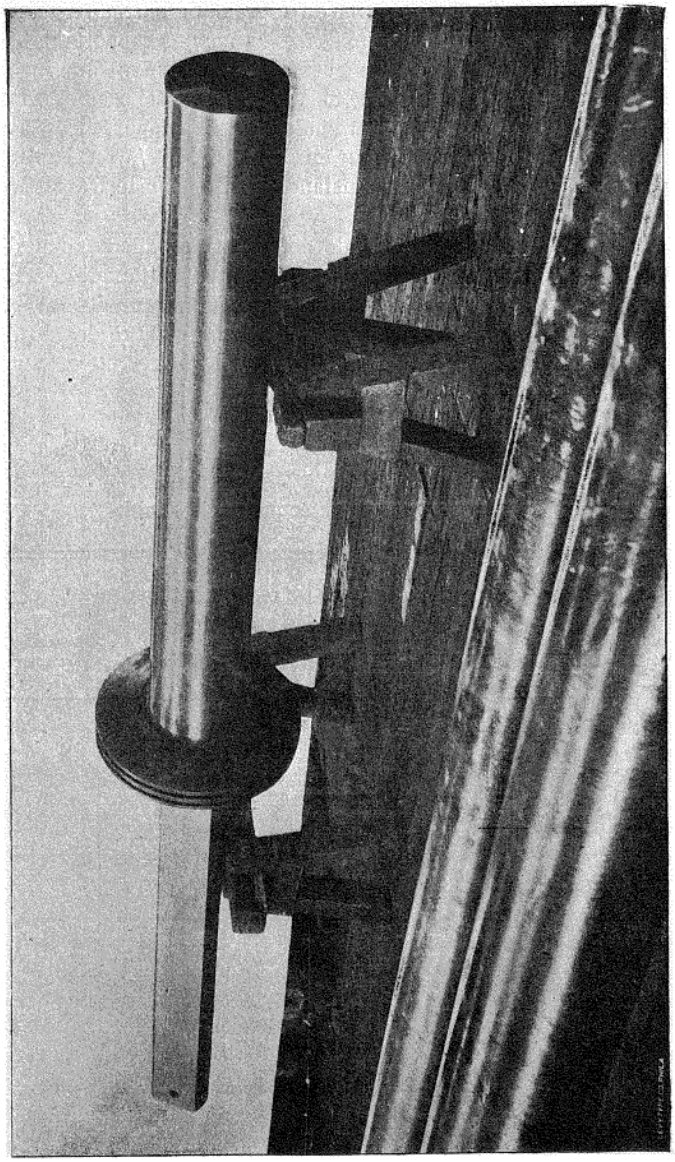


Fig. 12. — Tige de piston creuse pour marteau-pilon à vapeur, en acier au nickel trempé à l'huile, avec piston venu de forge. Diamètre au petit bout 406 millimètres, longueur totale 5m,534, poids 4 320 kilogrammes.

des essais de rigidité très sévères. La Compagnie des Aciéries Carnegie a fait des recherches très complètes à ce sujet. Des essieux en acier au nickel et en acier ordinaire ont été essayés au choc, avec un mouton dont la force vive était soigneusement proportionnée au diamètre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des essieux. D'après les moyennes obtenues d'après un grand nombre d'essais, on voit que l'acier ordinaire donne au premier coup de mouton une flèche de 184 millimètres et rompt au 47e coup, tandis que l'acier au nickel donne une flèche de 127 millimètres au premier coup de mouton, et ne rompt qu'au 68e coup[1]. A la suite de cet essai, on décida de munir d'essieux en acier au nickel plus de 600 wagons à marchandises de 45 tonnes de capacité.

La rigidité de l'acier au nickel le fait employer également pour les tiges de pistons et de marteaux-pilons. La figure 12 représente une tige de piston forgée dans les usines de la Compagnie des Aciéries Carnegie.

RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DE L'ACIER AU NICKEL

D'après les expériences de M. Rudeloff, la résistance au cisaillement du fer pur qui est de $27^{kg},3$ par millimètre carré augmente quand on introduit du nickel dans l'acier; le maximum a lieu pour une teneur en nickel de 15 %. M. Mannsel White a fait dernièrement sur des rivets en acier au nickel des essais qui ont montré la raison de ce fait. Les rivets en acier ordinaire essayés par M. White ont donné une résistance au cisaillement variant de $30^{kg},52$ à $32^{kg},20$ par millimètre carré, alors que celle des rivets en acier au nickel variait de $60^{kg},20$ à 63 kilogrammes par millimètre carré. M. White en conclut qu'un rivet en acier au nickel de 19 millimètres peut remplacer un rivet en acier ordinaire de 27 millimètres ou même de $28^{mm},5$, ce qui permet d'économiser une surface de tôle considérable tout en augmentant la résistance.

1. M. E.-J. Wood, ingénieur des Aciéries Carnegie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE III

ESSAIS DES ACIERS AU NICKEL

ESSAIS PHYSIQUES

Comme on peut le penser, il n'est pas nécessaire d'employer une machine spéciale pour la détermination des qualités physiques des aciers au nickel : on peut utiliser à cet effet une machine d'essai à la traction ou à la compression de système quelconque. Cependant, il est très important que les éprouvettes d'acier au nickel soient préparées au point de vue du traitement à chaud avec le même soin que les pièces de forge finies en acier au nickel. On peut mentionner l'incident suivant comme exemple de l'influence que peut avoir sur les éprouvettes un traitement à chaud mal conduit. En 1899, on demanda aux aciéries de Bethléhem quelques éprouvettes en acier au nickel pour les essayer au moyen d'une machine à essayer les entretoises. Ces éprouvettes furent fournies et, peu de temps après, l'usine reçut un rapport relatant que les résultats obtenus avec les éprouvettes en acier au nickel étaient les moins satisfaisants que l'on eût obtenus jusqu'alors. L'enquête démontra que l'ouvrier chargé de la machine d'essais, n'ayant pu fileter les éprouvettes, avait essayé de rendre le métal plus doux en les chauffant.

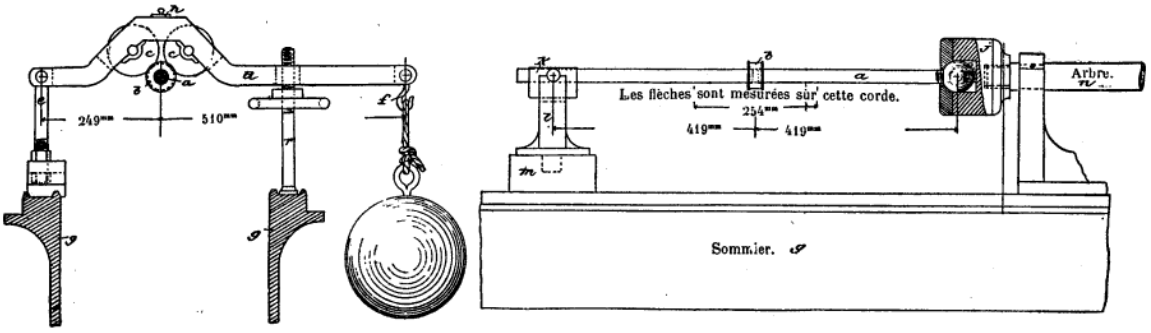


Fig. 13. — Appareil pour les essais d'endurance à la torsion des arbres, employé à l'arsenal de Watertown.

La Compagnie des aciéries de Béthléhem envoya alors une deuxième série d'éprouvettes découpées et filetées dans ses propres ateliers et destinées à être essayées avec la même machine. On obtint avec ces éprouvettes des résultats supérieurs à tous ceux que l'on avait obtenus jusqu'alors. Si le client n'avait pas découvert que l'accident arrivé à la première série d'éprouvettes était dû uniquement à la manière dont son ouvrier ignorant avait traité ces éprouvettes, il eût été conduit à croire que l'acier au nickel ne convenait pas pour l'usage qu'il voulait en faire.

La figure 13 représente le schéma d'un appareil destiné à effectuer sur l'acier au nickel les essais à la torsion mentionnés page 14. L'appareil consiste en un banc de tour ordinaire dont l'arbre moteur n est muni d'un manchon à bille et à douille j. A l'autre extrémité du banc est une boîte k garnie de métal blanc montée sur tourillons. Une des extrémités de l'éprouvette à essayer est vissée à l'intérieur de la sphère i qui est maintenue appliquée contre la face du manchon par un ressort à boudin o; l'autre bout de l'éprouvette repose dans la boîte k. Une bague folle rainée en bronze b, de 12 millimètres de large, est disposée au milieu de l'éprouvette. Un levier à contrepoids d repose sur cette bague par l'intermédiaire de galets à friction c : le rapport des bras de levier est de 1/3. L'effort exercé sur l'éprouvette peut être réglé en faisant varier le poids attaché à l'extré-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mité du levier. Quand on fait tourner l'éprouvette ainsi chargée au moyen de l'arbre moteur *n*, chaque fibre est soumise à des tensions changeant de sens alternativement.

Ces conditions d'essai sont imposées pour les métaux de la catégorie de ceux que l'on emploie dans la pratique actuelle pour les organes de machines tels que les essieux de chemins de fer, les arbres moteurs de machines, les boulons de manivelles et les têtes de bielles dont les fibres sont soumises à des efforts variant continuellement de la traction à la compression.

ESSAIS CHIMIQUES

La méthode bien connue qui consiste à séparer le nickel du fer au moyen de la précipitation à l'état d'acétate est trop lente pour être employée dans un laboratoire moderne. M. G.-H. Chase des aciéries de Midvale a développé la méthode indiquée par Roche pour la séparation au moyen de l'éther. La méthode de M. Chase est la suivante :

On fait dissoudre 2 grammes d'acier dans 40 centimètres cubes d'acide chlorhydrique (Sp. Gr. 1..1.). On traite par l'acide nitrique (3 centimètres cubes à 1/20e) et on évapore la liqueur de manière à en réduire le volume à 20 centimètres cubes. On verse la liqueur dans un entonnoir à séparation et on lave le ballon dans lequel on a opéré la dissolution avec de l'acide chlorhydrique étendu (Sp. Gr. 1/13). On ramène le volume de la liqueur à 40 centimètres cubes. On ajoute 40 centimètres cubes d'éther, puis on ferme l'entonnoir et on agite pendant cinq minutes. On laisse ensuite reposer la liqueur pour permettre la séparation et on recueille le résidu qui contient le nickel, le cuivre et l'aluminium à l'état de chlorures avec un peu de fer que l'éther n'a pas entièrement chassé. On verse cette liqueur dans un second entonnoir à séparation contenant 40 centimètres cubes d'éther. On lave le premier entonnoir avec quelques centimètres cubes d'acide chlorhydrique étendu; on laisse cet acide pénétrer jusqu'au fond du premier entonnoir et on le verse dans le second entonnoir qu'on agite pendant cinq minutes; on verse le résidu dans un vase contenant 5 ou 10 grammes de chlorure d'ammonium dissous dans 100 centimètres cubes d'ammoniaque et on fait bouillir pour chasser l'éther restant. On filtre la liqueur et on la rend faiblement acide en y ajoutant un peu d'acide chlorhydrique. On ajoute 10 grammes d'acétate de soude, on chauffe à 80° et on fait passer un courant d'hydrogène sulfuré pendant cinq minutes. On filtre, on lave avec de l'hydrogène sulfuré et on brûle le filtre. Quand le filtre est consumé, on laisse refroidir, on ajoute une pincée de carbonate d'ammoniaque et on chauffe pendant deux minutes à haute température, puis on laisse refroidir et on pèse. Le nickel est obtenu à l'état de sulfure (Ni_2S) mélangé d'un peu d'oxyde (NiO). On peut déduire de cette pesée la quantité de cuivre contenue dans l'acier.

La méthode de M. Chase est utilisée aux aciéries de Midvale et très employée par les chimistes. Quelques-uns pèsent directement le métal à l'état de sulfure, d'autres le dosent volumétriquement ou par l'électrolyse.

M. Harvey, chimiste des aciéries Homestead, a apporté à cette méthode les changements suivants :

On attaque l'acier et on sépare le nickel par l'éther, comme ci-dessus, puis on chauffe la liqueur contenant le nickel jusqu'à ce que l'éther ait été chassé. On élimine ensuite le fer restant par deux séparations à l'ammoniaque, puis on neutralise la liqueur bleue avec de l'acide acétique, puis on la rend faiblement ammoniacale et on précipite par l'hydrogène sulfuré. On ajoute de l'acide acétique, on fait bouillir quelques minutes, puis on filtre et on calcine pour obtenir de l'oxyde nickel. Pour doser le nickel, M. Harvey procède comme suit :

Après avoir séparé le fer, on neutralise la liqueur bleue avec de l'acide chlorhydrique, puis on la laisse refroidir et on la rend légèrement ammoniacale; on ajoute ensuite 5 centimètres cubes d'une solution d'iodure de potassium (20 grammes par litre) et 5 centimètres cubes d'une solution de nitrate d'argent (0gr,5 par litre). On titre avec une liqueur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

titrée de cyanure de potassium. En faisant dissoudre 9^{gr},2 de cyanure de potassium dans deux litres d'eau on obtient une liqueur dont 1 centimètre cube correspond à 0,1 de nickel. Le titrage peut s'opérer au moyen d'une solution de nickel connue. On titre jusqu'à ce que la teinte opalescente ait disparu et on déduit 0^{cc},6 (absorbés par le nitrate d'argent). La lecture sur la burette donne un nombre qui, divisé par 2, est la teneur du nickel exprimée en centièmes.

Aux usines de la *Canadian Copper C°*, on dose habituellement le nickel par l'électrolyse. Le sulfure précipité est dissous dans quelques centimètres cubes d'une liqueur formée d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique, dans laquelle on verse la quantité d'acide sulfurique nécessaire pour se combiner au nickel. On évapore jusqu'à ce qu'il se produise des fumées blanches; on dissout le tout dans de l'eau fortement ammoniacale et on soumet la liqueur à l'électrolyse, au moyen d'un courant suffisamment intense pour maintenir la solution de nickel ammoniacal dans un état de vive agitation. En chauffant le vase dans lequel on pratique l'électrolyse au moyen d'une petite lampe à alcool, on séparera tout le nickel en deux ou trois heures. Si l'on n'a pas grand intérêt à opérer très rapidement, l'électrolyse donne des résultats beaucoup plus satisfaisants que la méthode volumétrique ou que la méthode par pesée directe.

D.-H. BROWNE et H.-I.-J. PORTER.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

XII

EFFETS RELATIFS DE LA CORROSION SUR LE FER, L'ACIER DOUX ET L'ACIER AU NICKEL

DANS L'AIR, L'EAU DE MER ET L'EAU ORDINAIRE

COMMUNICATION

Présentée par M. HOWE

---

§ I. — INTRODUCTION

Nous exposerons, dans le présent mémoire, les résultats des recherches longues et sur une grande échelle que nous avons faites au sujet des effets relatifs de la corrosion sur le fer forgé (1), sur l'acier doux Bessemer (2), sur l'acier à 3.18 % de nickel (3), et sur l'acier à 26.441 % de nickel (4), quand on les expose pendant des périodes d'un et de deux ans à l'action de l'eau de mer (A), de l'eau douce (B) ou de l'air atmosphérique (C). Nous avons résumé et comparé avec les nôtres les résultats des recherches antérieures.

Les résultats obtenus avec le fer forgé et l'acier doux proviennent de la continuation d'essais entrepris par l'auteur sur les avantages respectifs des tubes en fer forgé et en acier Bessemer pour le compte de la *National Tube Works Company*[1].

Cette investigation démontra que les tubes en acier doux surpassent les tubes en fer forgé très grandement en résistance à la pression intérieure, et très considérablement en résistance à la force tractive, et quelque peu en ce qu'ils offrent moins de résistance à l'écoulement de l'eau.

Les essais sur l'acier au nickel ont été faits pour le compte du colonel Robert M. Thompson, président de la *Orford Copper Company*; et, grâce à sa courtoisie, ainsi qu'à celle des directeurs de la *National Tube Works Company*, j'ai pu me servir des résultats obtenus pour établir ce mémoire.

Mes études antérieures sur cette question m'avaient révélé la grande influence qu'ont, sur la marche de la corrosion, les différences accidentelles dans les conditions d'exposition ou du métal même, différences qui échappent à l'attention. Tout le monde sait que la rouille se forme en certains points d'une lame de couteau, le reste de la lame demeurant poli. C'est la preuve qu'il existe entre les divers points de la lame des différences d'état qui nous sont inconnues, sinon la rouille attaquerait uniformément toute sa surface.

1. *Report on the relative Merits of Wrought-Iron and Steel Pipes*, juin 1897. Un nombre limité d'exemplaires de ce rapport pourront être distribués aux personnes qui s'adresseront à la " National Tube Works Company ", à Mc. Keesport (Pa), ou à l'auteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous citerons comme autre exemple ce fait que, au cours de mes expériences, la perte de poids due à la corrosion subie pendant la première année, par la tôle d'acier à 3.18 % de nickel n° 235, était supérieure de 59 % à celle qu'a subie la plaque n° 209, exactement semblable en apparence, et exposée simultanément à côté de la première à l'action de l'air atmosphérique dans des conditions qui paraissaient absolument identiques (voir § 16).

Étant donnée la grande influence de ces différences qui nous échappent, nous ne déduirons pas une loi régissant les aptitudes à la corrosion du fer forgé et de l'acier doux en déterminant la perte de poids par corrosion de deux petits échantillons de tôle de chaque métal, pas plus que nous ne mesurerons le premier allemand et le premier italien que nous rencontrerons dans la rue, en vue d'en déduire la taille moyenne relative des individus de ces deux races.

Il m'a semblé douteux que les expériences antérieures aient été faites sur une assez grande échelle pour que l'établissement des moyennes aient pu faire disparaître l'influence de ces différences accidentelles; en tous cas, j'ai pensé que mes propres essais auraient plus de poids — soit pour confirmer, soit pour infirmer les expériences antérieures — si je les exécutais en grand. Par conséquent, mes essais ont porté sur un grand nombre d'échantillons de tôles de grandes dimensions de chaque métal.

§ 2. — EXPÉRIENCES ANTÉRIEURES

J'ai réuni dans les tableaux 8 et 9 les résultats fournis par toutes les recherches faites par des auteurs dignes de confiance[1] qui sont à ma connaissance et accessibles. Le tableau 8 donne la perte de poids annuelle absolue, en grammes, par décimètre carré de surface, causée par la corrosion; le tableau 9 donne la perte de poids de l'acier, comparativement à celle du fer forgé.

DESCRIPTION DES ESSAIS

§ 3. Description générale. — Les essais ont porté sur 36 tôles de fer forgé, 35 tôles d'acier Bessemer contenant de 0.07 à 0.08 % de carbone, 36 tôles d'acier à 3.18 % de nickel et 54 tôles d'acier à 26.44 % de nickel. Ces tôles, soigneusement isolées de tout contact métallique[2], furent soumises pendant deux périodes d'environ un an chacune à l'action de l'eau de mer non confinée, de l'eau douce et de l'air atmosphérique (voir tableau 1).

TABLEAU 1

Distribution générale des essais.

DÉSIGNATIONS DIVERSES	FER FORGÉ			ACIER DOUX BESSEMER		
	NOMBRE de tôles	SURFACE des tôles	POIDS des tôles	NOMBRE de tôles	SURFACE des tôles	POIDS des tôles
		mèt. carrés	kilogr.		mèt. carrés	kilogr.
Eau de mer	12	5,95	95,71	11	5,57	82,10
Eau douce	12	6,04	90,26	12	6,15	92,53
Air atmosphérique	12	6,04	91,62	12	6,32	89,81
TOTAUX	36	18,03	277,59	35	18,02	264,44

1. Je n'ai pu me procurer les résultats des essais faits par la Commission des chaudières de l'Amirauté britannique. Je n'ai pas tenu compte des résultats obtenus par feu M. Phillips (*Proc. Inst. Civ. Eng.*, 1881, LXV, p. 75, et *Trans. Inst. Marine Eng.*, 1890) parce qu'ils m'ont paru très peu dignes de confiance, attendu que les précautions les plus élémentaires ont été négligées, comme je l'ai exposé. (Voir *Mineral Industry*, IV, 1896, pp. 438, 441 et 442.)

2. Sauf que deux plaques de chaque métal étaient liées à dessein, chaque, à une pièce de zinc, pour déterminer l'influence de ce métal sur la marche de la corrosion (Voir § 11).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Chaque tôle avait environ $0^m,610$ de long, $0^m,406$ de large et $0^m,00317$ d'épaisseur. Le poids total de toutes les tôles était de $1177^{kg},97$ et la surface totale exposée était de $86^{m^2},21$, soit environ 30 fois plus que dans les expériences de Parker[1] et 25 fois plus que dans les expériences de Krupp[2]; ces deux groupes d'essais sont des plus importants des essais antérieurs.

§ 4. **Métaux soumis aux essais.** — A. *Fer forgé.* — Je commandai à une grande maison de commission, comme s'il s'agissait d'une commande ordinaire, trois lots — un à chacun des trois plus importants fabricants d'Amérique — de 7 tuyaux en fer forgé de $0^m,143$ de diamètre, de la qualité désignée sous le nom de « *casing* », pesant $14^{kg},88$ par mètre courant.

Un des trois fabricants avait une réputation hors ligne; les deux autres avaient une très bonne réputation. Je choisis au hasard quatre tuyaux parmi ceux fournis par chaque fabricant, soit en tout douze tuyaux. Dans chacun de ces douze tuyaux, je fis découper un morceau de $0^m,610$ de longueur, qui fut ensuite fendu, puis développé; les tôles ainsi obtenues avaient environ $0^m,610$ de longueur, $0^m,40$ de largeur et 4 millimètres d'épaisseur. Les tuyaux du premier fabricant furent numérotés, 13, 14, 15 et 16, ceux du second 33, 34, 35 et 36, ceux du troisième 53, 54, 55 et 58; les morceaux découpés dans le tuyau 13 furent numérotés 13-1, 13-2, 13-3, etc., etc.

B. *Acier doux Bessemer.* — Je choisis au hasard cinq lots différents comprenant en tout 16 longueurs complètes de tuyaux de $0^m,143$ en acier qualité « *casing* », provenant des quais d'expédition et des halles de laminage des usines de Mc. Keesport (Pa), appartenant à la *National Tube Works C°*. Je choisis de ces lots au hasard 12 tuyaux que je numérotai de 105 à 116[3]. Dans chaque tuyau je fis découper trois morceaux de $0^m,610$ de longueur; chaque morceau fut ensuite fendu et développé de manière à former une tôle d'environ $0^m,610$ de longueur sur $0^m,406$ de large et 4 millimètres d'épaisseur. Les trois tôles provenant du tuyau n° 105 furent numérotées 105-1, 105-2, 105-3, etc., etc.

C. *Acier au nickel.* — Les deux lots de tôles d'acier au nickel furent laminés spécialement en vue de ces essais. Les morceaux de tôle avaient environ $0^m,610$ de longueur sur $0^m,450$ de largeur avec $3^{mm},3$ d'épaisseur pour l'acier à 3.18 % de nickel, fourni par la *Carnegie Steel Company*, et 3 millimètres d'épaisseur pour l'acier à 26.441 % de nickel fourni par la *Bethlehem Iron Company*; les deux lots avaient été commandés par la *Orford Copper Company*.

TABLEAU 1

Distribution générale des essais.

ACIER à 3,18 0/0 DE NICKEL			ACIER à 26,44 0/0 DE NICKEL			TOTAL		
NOMBRE de tôles	SURFACE des tôles	POIDS des tôles	NOMBRE de tôles	SURFACE des tôles	POIDS des tôles	NOMBRE de tôles	SURFACE des tôles	POIDS des tôles
	mèt. carrés	kilogr.		mèt. carrés	kilogr.		mèt. carrés	kilogr.
12	6,78	89,81	12	6,69	83,00	47	24,99	350,62
12	6,69	86,18	18	10,03	123,83	54	28,89	392,80
12	6,69	88,90	24	13,38	165,10	60	32,43	435,43
36	20,06	264,89	54	30,10	371,93	161	86,21	1178,85

1. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1881, I, p. 59.
2. *Stahl und Eisen*, XVI, p. 561, 1896.
3. J'avais déjà déterminé la résistance à la rupture transversale de ces tuyaux de fer forgé et d'acier (*Essais sur la résistance à la rupture des tuyaux*, pp. 7 et 8) dans mon précédent rapport. Le numérotage des tuyaux mentionnés dans le présent rapport correspond exactement à celui des tuyaux dont il est question dans mon précédent rapport.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 2

Composition chimique des métaux soumis aux essais.

DÉSIGNATION DES TOLES		N°	C	Si	Mn	Ph	S	Oxyde	—	Ni
Fer forgé. .	Usine A. . .	13	traces	0.18	traces	0.249	0.016	2.72	Mn + Si × 5.2	»
		14	traces	0.19	traces	0.179	0.025	2.00		»
		15	traces	0.17	traces	0.175	0.021	1.83		»
		16	traces	0.20	traces	0.327	0.020	1.81		»
	Usine B. . .	33	traces	0.23	traces	0.228	0.015	1.20		»
		34	traces	0.23	traces	0.130	0.016	2.33		»
		35	traces	0.24	traces	0.172	0.022	1.75		»
		36	traces	0.21	traces	0.147	0.018	2.10		»
	Usine C. . .	53	traces	0.20	traces	0.212	0.032	1.60		»
		54	traces	0.13	traces	0.168	0.040	1.65		»
		55	traces	0.18	traces	0.217	0.035	2.43		»
		58	traces	0.13	0,10	0.147	0.038	2.13		»
Acier Bessemer acide. . . .		105	0.07	0.021	0.34	0.107	0.050	0.40	0.45	»
		106	0.08	0.023	0.35	0.128	0.064	0.32	0.47	»
		107	0.07	0.008	0.30	0.111	0.047	0.48	0.34	»
		108	0.07	0.009	0.30	0.118	0.060	0.52	0.35	»
		109	0.07	0.022	0.25	0.112	0.075	0.25	0.37	»
		110	0.08	0.009	0.35	0.117	0.064	0.45	0.40	»
		111	0.07	0.007	0.37	0.115	0.058	0.39	0.40	»
		112	0.08	0.021	0.24	0.113	0.056	0.30	0.35	»
		113	0.07	0.022	0.38	0.116	0.059	0.35	0.49	»
		114	0.08	0.021	0.31	0.120	0.057	0.62	0.42	»
		115	0.07	0.020	0.31	0.114	0.050	0.50	0.42	»
		116	0.08	0.020	0.26	0.093	0.059	0.28	0.37	»
Acier à 3.18 % de nickel. .		. .	0.22	0.060	0.90	0.011	0.020	Cu	»	3.18
Acier à 26.441 % de nickel.		. .	0.362	0.21	0.68	0.026	0.034	0.067	»	26.44

§ 5. Préparation des tôles. — Chaque tôle fut décapée par immersion dans l'acide sulfurique étendu, afin d'en éliminer les particules de rouille et les battitures. Les tôles de fer forgé, d'acier doux et d'acier à 3.18 % de nickel furent immergées dans un bain formé de 100 parties d'eau douce pure et de 6 parties d'acide sulfurique à 60° B.; on prolongea l'immersion assez longtemps pour permettre l'enlèvement facile des battitures et de la rouille; ce résultat était obtenu au bout d'environ 1 heure 1/2 d'immersion. On les lavait ensuite à la lance; on les séchait rapidement en les frottant avec du déchet de coton jusqu'à ce que toute trace d'humidité eût disparu à leur surface, puis on les faisait osciller dans l'air.

Les tôles d'acier à 26.44 % de nickel étaient recouvertes de battitures tellement adhérentes que leur immersion dut être prolongée pendant un temps beaucoup plus considérable. On ne pouvait détacher facilement les battitures qu'au bout d'une immersion d'environ 5 heures 1/2, dans de l'acide à la même densité que ci-dessus, soit 100 parties d'eau douce pure et 6 parties d'acide sulfurique à 60° B., et même on ne put parvenir à enlever complètement ces battitures. Les tôles destinées à être soumises à l'action de l'air atmosphérique et de l'eau douce furent immergées de nouveau dans l'acide sulfurique pendant 6 jours, 15 heures. Celles qui étaient destinées à être soumises à l'action de l'eau de mer, qui furent préparées plus tard, ne subirent qu'une seule immersion

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans de l'acide de même force, pendant 78 heures. Dans chaque cas, ces tôles d'acier au nickel furent parfaitement polies avec de la toile-émeri (n° 2 1/2) et séchées avec du déchet de coton.

§ 6. **Pesage.** — Le pesage fut effectué au moyen d'une grande balance à double fléau, sensible au demi-gramme.

§ 7. **Dispositifs pris pour exposer les tôles à l'action de l'eau et de l'air.** — A. *Eau de mer.* — Afin de rendre les résultats comparables avec ceux des autres expérimentateurs, il était à désirer que l'eau de mer fût pure et exempte de toute contamination provenant

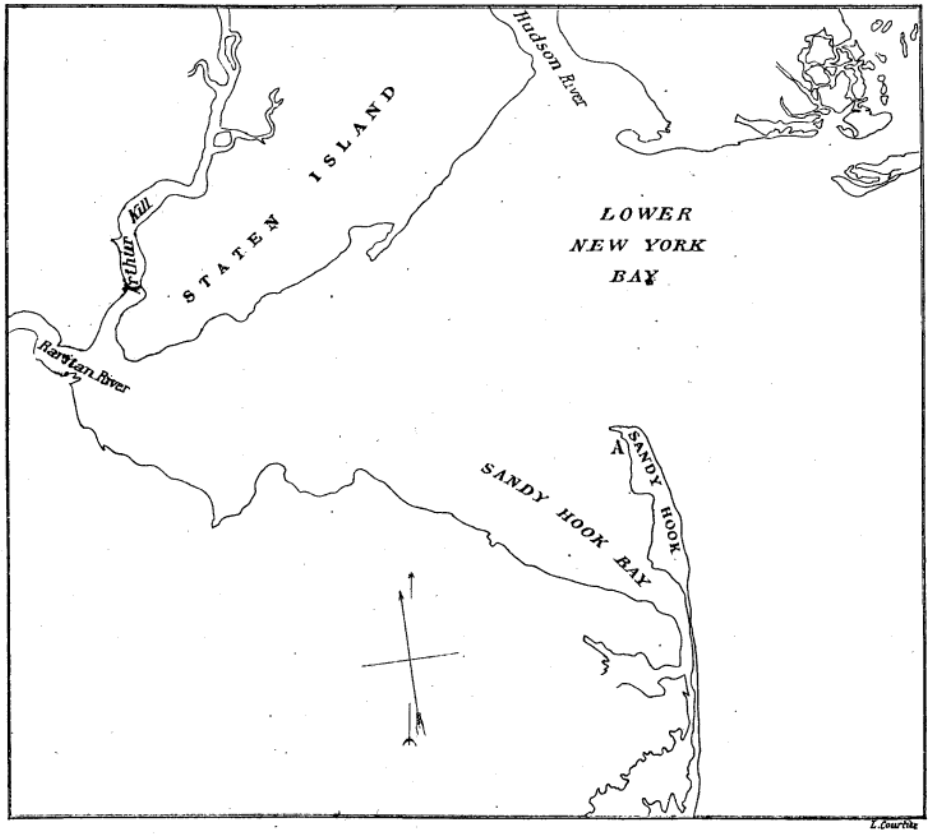


Fig. 1. — A. Pier.

d'un mélange d'eau d'égout ou d'eau douce. On ne devait donc pas choisir un lieu dans le voisinage d'une grande ville ou d'un grand fleuve. On devait disposer en même temps d'une construction solide, telle qu'une jetée, pour pouvoir y fixer solidement les caisses à claire-voie contenant les tôles soumises à l'essai, et les empêcher d'être entraînées par les tempêtes ou par les glaces. Les caisses à claire-voie elles-mêmes devaient être protégées contre les curieux et autres.

Après mûr examen, la jetée du gouvernement des États-Unis, à Sandy Hook (fig. 1), fut choisie comme réunissant à un plus haut degré que toute autre place convenable toutes les qualités requises.

Sandy Hook est un promontoire long et étroit qui s'avance vers le nord dans l'Océan et enclosant la Raritan Bay. La jetée est située à l'ouest du promontoire, c'est-à-dire du côté de la terre, de sorte que les caisses à claire-voie ne sont pas exposées à de très fortes vagues. En même temps, elle est assez éloignée de l'embouchure de l'Hudson, à New-York, et de celle de la rivière Raritan, pour que l'eau de mer ne puisse y être mélangée à de l'eau douce ou contaminée par des eaux d'égout sensiblement. J'estime que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la quantité d'eau douce et d'eau d'égout apportée du sud par les rivières Shrewsbury et Navesink est négligeable. On aurait préféré un emplacement encore plus éloigné des embouchures de rivière et des bouches d'égout; et on aurait cru, à première vue, pouvoir le trouver facilement; mais, après examen, on a rejeté l'un après l'autre plusieurs emplacements pour une raison ou pour une autre, ordinairement à cause de la contamination de l'eau de mer, ou à cause de la violence des vagues dans certaines circonstances. Si l'on considère l'énorme volume d'eau de mer pure qui passe avec les marées dans la Raritan Bay, et qu'on le compare avec le faible débit de l'Hudson et de la Raritan, on peut voir que les chances de contamination n'ont, dans l'espèce, aucune importance. Même si l'on considère les perturbations imprévues dues aux plantes marines et aux cirrhopodes qui s'attachent aux tôles, et à d'autres causes locales, les précautions prises en choisissant pour les essais cet emplacement inaccessible peuvent paraître exagérées.

Les caisses à claire-voie contenant les tôles étaient solidement boulonnées sur des pièces de bois fixées aux pilotis de la jetée. La surface supérieure des caisses à claire-voie était placée à 60 centimètres au-dessous du niveau des basses mers, de manière que les tôles ne pussent jamais être exposées à l'air, et ne fussent jamais en contact qu'avec l'eau de mer.

B. *Eau douce et air atmosphérique.* — Les caisses à claire-voie soumises à l'action de l'eau douce étaient immergées dans un grand étang que traverse le bras méridional de la rivière Raritan, à High Bridge, New Jersey (lat. 40°40′N., long. 74°54′O.; température moyenne annuelle, 45° à 55° F.; chute de pluie annuelle, 1m,016 à 1m,270)[1].

Les caisses à claire-voie exposées à l'action de l'air atmosphérique étaient placées sur le versant sud-est d'une colline, au milieu d'un champ étendu et découvert à la même place.

Je dois remercier le colonel William Ludlow, de l'armée fédérale, qui m'a accordé l'autorisation de me servir de la jetée de Sandy Hook, et M. Walter Gaston, directeur général de la " Taylor Iron and Steel Company " qui m'a autorisé à me servir de sa propriété de High Bridge; tous deux ont été d'une grande courtoisie et ont été pour moi de précieux auxiliaires.

§ 8. **Mise en caisses.** — Toutes les tôles étaient placées dans de grandes caisses à claire-voie, en bois, dans lesquelles étaient pratiquées des rainures de 12 millimètres de largeur (fig. 2 et 3). Chaque tôle était isolée des plaques voisines et de tout contact métallique par les rainures en bois de la caisse. Chaque caisse, fermée aux extrémités, était munie d'un couvercle et d'un fond, mais était ouverte sur les côtés, de manière à permettre la libre circulation de l'air et de l'eau parallèlement à la surface des tôles[2].

Ordre de mise en place des tôles. — Chaque caisse contenait une série de 24 où 30 tôles[3], comprenant de 5 à 12 échantillons de chacune des quatre catégories de tôles essayées. Pour éviter, autant que possible, toute variation d'état dans les diverses parties d'une même caisse, les tôles appartenant à une même catégorie de métal avaient été dispersées sur toute la longueur de la caisse, c'est-à-dire que les tôles étaient alternées dans l'ordre suivant :

1° Une tôle de fer forgé;
2° Une tôle d'acier doux;
3° Une tôle d'acier à 26.441 de nickel;
4° Une tôle d'acier à 3.18 % de nickel;
5° Une tôle de fer forgé;
6° Une tôle d'acier doux;

et ainsi de suite pour toute la longueur de la caisse.

1. *Statistics of the Population of the United States*, etc., 10e recensement, 1er juin 1880, pp. 56 et 65.

2. Les tôles étaient fixées de la manière suivante : des réglettes en bois *bb* de 5 centimètres de côté, 46 centimètres de long, étaient fixées transversalement au nombre de 25 à 31 à l'intérieur du couvercle de chaque caisse; on en fixait le même nombre à l'intérieur du fond de la caisse. On ménageait entre les réglettes un intervalle de 12 millimètres, ce qui formait des rainures sur le couvercle et sur le fond. Dans chaque rainure, on insérait une tôle, et pour empêcher les tôles de glisser hors des rainures, on les maintenait par des réglettes longitudinales en bois *aa* vissées dans les caisses.

3. Cette différence dans le nombre des tôles des différentes sortes de métal introduites dans chaque caisse provient de ce que le nombre de plaques en essai n'était pas le même pour toutes les sortes de métal : l'ordre de succession des tôles ne pouvait donc être toujours suivi.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

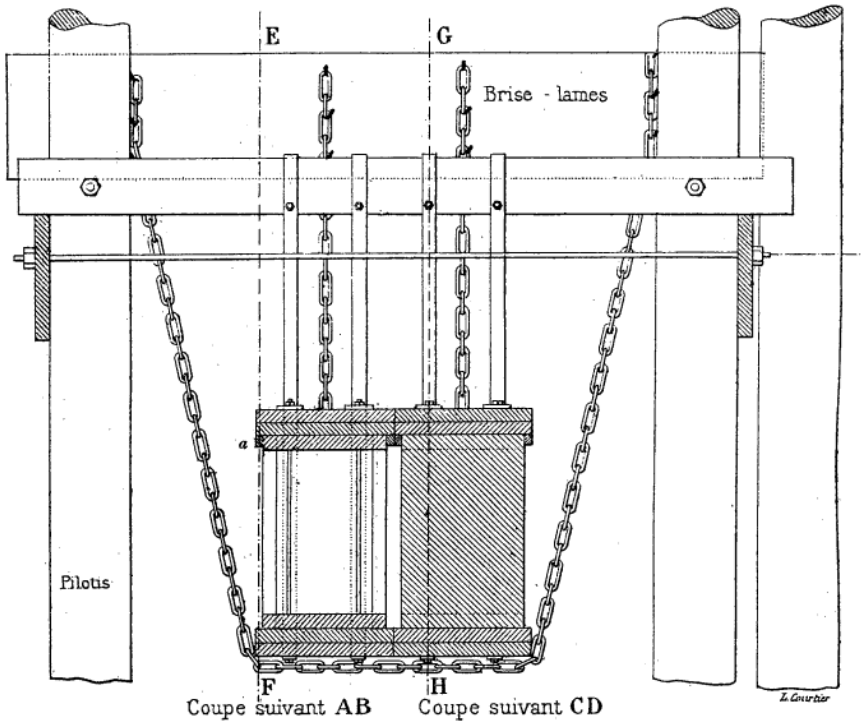


Figure 2.

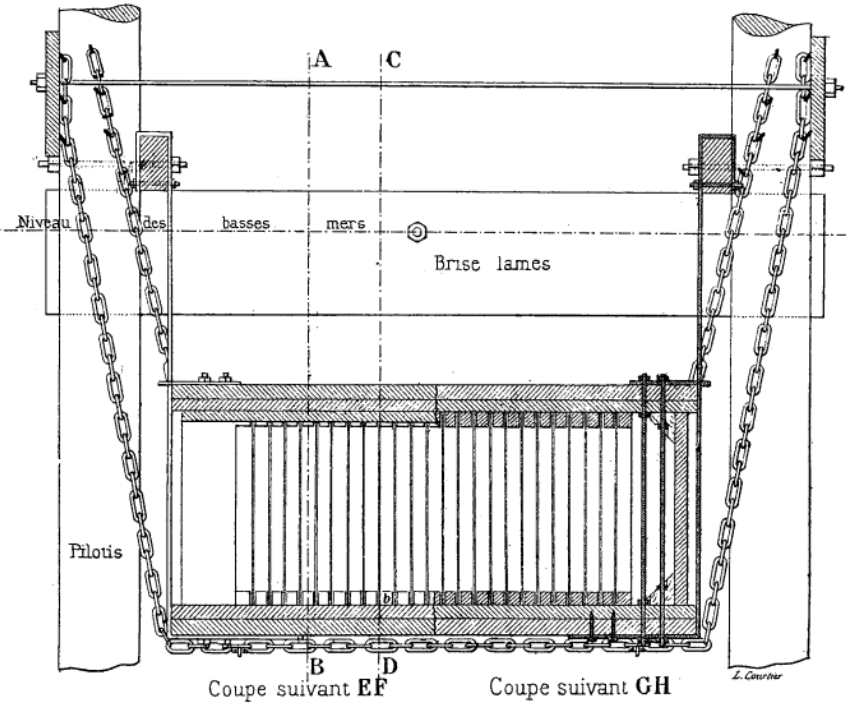


Figure 3.

Fig. 2 et 3. — Disposition des caisses d'expérience le long du " Pier " de Sandy Hook.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 3

Détail des résultats d'essais des tôles de fer forgé.

DÉSIGNATIONS DIVERSES		EAU DE MER															
NUMÉROS DES TÔLES		35-2	13-3	33-3	35-1	36-3	15-1	14-3	13-2	33-1	58-2	15-2	53-3	MOYENNES EN KILOGR.	MOYENNES EN GRAMMES
Surface totale en décimètres carrés		50,29	48,46	48,66	50,37	50,25	49,36	50,13	49,28	49,91	50,07	50,09	50,81	»	»
Poids initial en kilogrammes		7,859	7,413	7,776	7,752	6,878	7,505	7,880	7,411	7,790	8,031	7,692	7,598	7,632	»
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	2e année	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	MOYENNE ANNUELLE calculée sur la période entière.	10,81	9,89	11,03	10,35	10,63	5,24	2,98	3,69	3,96	4,25	4,26	5,77	» Caisse 1	9,67

DÉSIGNATIONS DIVERSES		EAU DOUCE														
NUMÉROS DES TÔLES		33-2	55-3	53-2	58-3	16-1	16-2	53-1	54-1	54-3	55-2	36-2	36-1	MOYENNES EN KILOGR.	MOYENNES EN GRAMMES	EN GRAMMES non compris les tôles mises en connexion avec le zinc
Surface totale en décimètres carrés		49,40	49,89	50,65	50,41	49,71	49,36	50,83	49,85	49,65	50,11	50,73	50,47	»	»	
Poids initial en kilogrammes		7,869	7,861	7,701	7,873	6,715	6,715	7,727	7,728	7,686	7,956	7,214	7,139	7,515	»	»
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année	6,65	7,29	6,72	6,85	6,90	7,11	6,15	6,06	5,97	5,68	6,19	5,92	»	6,46	6,54
	2e année	5,72	5,60	5,64	6,14	6,12	6,28	6,37	5,78	6,09	6,13	6,04	6,09	»	6,00	6,01
	MOYENNE ANNUELLE calculée sur la période entière.	6,20	6,45	6,15	6,50	6,50	6,69	6,26	5,92	6,03	5,91 Zn	6,11	6,01	»	6,23	6,27

DÉSIGNATIONS DIVERSES		AIR ATMOSPHÉRIQUE														
NUMÉROS DES TÔLES		58-1	15-3	16-3	34-3	34-2	54-2	14-2	35-3	13-1	55-1	34-1	14-1	MOYENNES EN KILOGR.	MOYENNES EN GRAMMES	EN GRAMMES non compris les tôles mises en connexion avec le zinc
Surface totale en décimètres carrés		53,93	49,48	49,79	49,69	49,79	50,13	50,20	50,67	49,26	49,97	50,75	49,94	»	»	
Poids initial en kilogrammes		7,955	7,571	6,689	7,612	7,780	7,559	8,040	7,608	7,093	7,707	7,966	7,871	7,621	»	»
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année	1,78	2,24	1,95	2,17	2,28	1,85	2,35	2,10	2,11	2,29	1,99	1,90	»	2,08	2,09
	2e année	2,17	1,80	2,15	2,24	2,33	2,57	2,26	2,06	2,15	2,25	2,45	2,37	»	2,23	2,21
	MOYENNE ANNUELLE calculée sur la période entière.	1,98	2,02	2,05	2,20	2,30	2,21	2,30	2,08	2,13	2,27	2,22 Zn	2,14	»	2,15	2,15

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 4

Détail des résultats d'essais des tôles d'acier doux.

DÉSIGNATIONS DIVERSES		EAU DE MER					EAU DE MER								
NUMÉROS DES TÔLES		105-3	111-1	107-3	112-2	115-3	114-2	106-1	109-3	115-2	115-1	108-2		MOYENNES EN KILOGR.	MOYENNES EN GRAMMES
Surface totale en décimètres carrés		52,69	51,76	50,89	50,60	50,39	51,95	50,09	50,17	49,93	50,11	49,17	»	»	»
Poids initial en kilogrammes		8,220	7,519	7,630	7,582	7,063	7,314	7,640	7,135	7,050	7,047	7,986	»	7,471	»
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	2e année	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	MOYENNE ANNUELLE calculée sur la période entière.	12,24	12,61	12,68	10,29	9,75	3,83	3,55	4,59	5,39	5,35	6,18	»	» Caisse I	11,52

DÉSIGNATIONS DIVERSES		EAU DOUCE					EAU DOUCE								
NUMÉROS DES TÔLES		116-3	105-2	110-2	113-2	111-2	105-1	112-3	108-3	113-1	107-1	110-3	116-2	MOYENNES EN KILOGR.	MOYENNES EN GRAMMES	MOYENNES EN GRAMMES non compris les tôles mises en connexion avec le zinc.
Surface totale en décimètres carrés		50,67	52,52	50,69	51,57	52,46	52,00	50,91	49,93	52,32	52,72	50,41	50,92	»	»	
Poids initial en kilogrammes		7,529	7,993	7,346	7,917	7,677	8,093	7,359	8,023	8,027	7,754	7,120	7,569	7,700	»	»
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année	6,24	6,55	6,47	6,47	6,67	6,57	6,16	5,87	5,69	5,80	5,86	5,96	»	6,17	6,21
	2e année	5,81	5,69	5,74	5,46	5,63	5,29	5,59	6,07	5,67	5,52	4,96	5,36	»	5,57	5,51
	MOYENNE ANNUELLE calculée sur la période entière.	6,03	6,12	6,06	5,92	6,15	5,83	5,88	5,97 Zn	5,68	5,66	5,41	5,66	»	5,87	5,86

DÉSIGNATIONS DIVERSES		AIR ATMOSPHÉRIQUE					AIR ATMOSPHÉRIQUE								
NUMÉROS DES TÔLES		116-1	109-1	112-1	106-3	110-1	108-1	109-2	114-3	106-2	107-2	114-1	111-3	MOYENNES EN KILOGR.	MOYENNES EN GRAMMES	MOYENNES EN GRAMMES non compris les tôles mises en connexion avec le zinc.
Surface totale en décimètres carrés		55,14	56,54	51,17	50,33	50,31	50,61	56,93	52,69	50,53	52,34	52,18	52,96	»	»	
Poids initial en kilogrammes		7,385	7,174	7,573	7,464	7,270	8,133	6,970	7,305	7,821	7,715	7,139	7,730	7,473	»	»
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année	2,03	2,04	2,49	2,54	2,21	2,47	2,17	2,22	1,95	2,03	2,33	2,07	»	2,21	2,24
	2e année	1,92	1,87	2,16	2,22	2,30	2,55	2,15	2,12	2,59	2,44	2,12	2,35	»	2,23	2,20
	MOYENNE ANNUELLE calculée sur la période entière.	1,98	1,96	2,33	2,38	2,26	2,51	2,16	2,17	2,27 Zn	2,24	2,23	2,21	»	2,22	2,22

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 5

Détail des résultats d'essais des tôles d'acier à 3,18 % de nickel.

DÉSIGNATIONS DIVERSES		EAU DE MER					EAU DE MER								
NUMÉROS DES TÔLES		230	212	206	229	215	204	213	222	219	227	211	201	MOYENNES EN KILOGR.	MOYENNES EN GRAMMES
Surface totale en décimètres carrés		56,26	56,46	57,12	55,19	55,76	55,56	56,62	56,48	56,22	56,28	56,12	56,50	»	»
Poids initial en kilogrammes		6,909	8,211	7,984	7,455	7,457	7,147	7,869	6,946	7,287	7,453	7,608	7,481	7,484	»
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	2e année	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	MOYENNE ANNUELLE calculée sur la période entière.	9,54	8,55	8,00	7,54	7,60	8,59	2,05	2,29	2,54	2,90	3,56	5,78	» Caisse I	8,30

DÉSIGNATIONS DIVERSES		EAU DOUCE						EAU DOUCE								
NUMÉROS DES TÔLES		205	208	231	207	203	228	220	214	224	223	202	210	MOYENNES EN KILOGR.	MOYENNES EN GRAMMES	MOYENNES EN GRAMMES
Surface totale en décimètres carrés		55,72	56,36	56,44	55,80	55,47	55,74	55,94	55,83	55,47	55,17	55,92	56,18	»	»	non compris les tôles mises en connexion avec des tiges de zinc.
Poids initial en kilogrammes		7,074	6,992	7,052	7,190	7,142	7,415	7,550	7,688	6,911	7,379	6,972	6,994	7,180	»	»
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année	5,32	5,40	5,09	5,37	5,64	5,40	5,17	5,07	5,03	4,91	5,20	4,78	»	5,20	5,23
	2e année	4,99	5,01	4,68	4,66	4,68	5,25	4,76	4,93	4,76	4,87	4,65	4,62	»	4,82	4,84
	MOYENNE ANNUELLE calculée sur la période entière.	5,16	5,21	4,88	5,02	5,16	5,33	4,97	5,00	4,90	4,89	4,93	4,70 Zn	»	5,01	5,04

DÉSIGNATIONS DIVERSES		AIR ATMOSPHÉRIQUE						AIR ATMOSPHÉRIQUE								
NUMÉROS DES TÔLES		221	236	216	233	235	225	234	232	226	209	218	217	MOYENNES EN KILOGR.	MOYENNES EN GRAMMES	MOYENNES EN GRAMMES
Surface totale en décimètres carrés		55,70	56,64	56,18	56,04	55,43	56,32	56,18	55,37	55,33	56,00	56,48	56,21	»	»	non compris les tôles mises en connexion avec des tiges de zinc.
Poids initial en kilogrammes		7,076	7,570	6,884	7,138	7,097	6,962	7,764	7,165	7,404	7,480	8,154	8,020	7,393	»	»
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année	1,24	1,24	1,23	1,36	1,69	1,21	1,23	1,34	1,25	1,07	1,19	1,11	»	1,26	1,28
	2e année	1,60	1,60	1,48	1,41	1,23	1,77	1,52	1,60	1,74	1,82	1,92	1,79	»	1,63	1,62
	MOYENNE ANNUELLE calculée sur la période entière.	1,42	1,42	1,36	1,38	1,46	1,49	1,38	1,47	1,50	1,45	1,56	1,45 Zn	»	1,45	1,45

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 6

Détail des résultats d'essais des tôles d'acier à 26.44 % de nickel.

DÉSIGNATIONS DIVERSES		EAU DE MER					EAU DE MER								
NUMÉROS DES TÔLES														MOYENNES EN KILOGR.	MOYENNES EN GRAMMES
Surface totale en décimètres carrés		55,47	55,33	55,22	55,68	55,32	55,33	55,44	55,50	55,63	55,47	55,56	55,77	»	»
Poids initial en kilogrammes		7,187	6,706	7,058	7,040	6,827	6,673	7,054	7,021	7,052	7,020	6,502	6,955	6,924	»
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	2e année	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	MOYENNE ANNUELLE calculée sur la période entière.	2,63	3,38	2,90	2,63	2,92	2,70	1,14	1,35	1,75	1,68	1,83	1,68	» Caisse I	2,88

DÉSIGNATIONS DIVERSES		EAU DOUCE								EAU DOUCE												
NUMÉROS DES TÔLES		338	323	303	312	308	334	329	342	340	339	305	322	326	319	304	336	331	313	MOYENNES EN KILOGR.	MOYENNES EN GRAMMES	MOYENNES EN GRAMMES
Surface totale en décimètres carrés		55,48	55,59	55,42	55,38	55,38	55,46	55,74	55,50	55,65	55,46	55,54	55,50	55,59	55,62	55,63	55,50	55,78	55,74	»	»	non compris les tôles mises en connexion avec des tiges de zinc.
Poids initial en kilogrammes		6,428	7,310	6,755	6,906	7,154	6,824	7,231	6,850	6,746	7,031	6,710	6,907	6,923	6,775	6,834	6,460	7,061	6,830	6,874	»	
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année	1,62	1,73	1,67	1,78	1,71	1,65	1,49	1,64	1,68	1,54	1,66	1,62	1,64	1,52	1,60	1,87	1,53	1,72	»	1,65	1,66
	2e année	2,09	2,38	2,18	2,28	2,46	2,19	1,73	2,09	1,83	2,09	2,71	2,44	2,34	2,66	2,45	2,32	2,43	1,90	»	2,25	2,26
	MOYENNE ANNUELLE calculée sur la période entière.	1,85	2,06	1,93	2,03	2,09	1,92	1,61	1,87	1,76	1,82 Zn	2,18	2,03	1,99	2,09	2,03	2,10	1,98	1,81	»	1,95	1,96

DÉSIGNATIONS DIVERSES		AIR ATMOSPHÉRIQUE										AIR ATMOSPHÉRIQUE													
NUMÉROS DES TÔLES		314	325	315	327	317	341	311	307	335	328	306	301	332	318	330	316	320	310	324	333	309	337	302	321	MOYENNES EN KILOG.	MOYENNES EN GRAMM.	MOYENNES EN GRAMM.
Surface totale en décimètres carrés		56,48	55,65	55,57	55,74	55,72	55,54	55,55	55,57	55,57	55,42	55,62	55,50	55,47	55,47	55,64	55,56	55,48	55,77	55,59	55,59	55,80	55,68	55,59	55,48	»	»	non compris les tôles mises en connexion avec des tiges de zinc.
Poids initial en kilogrammes		6,810	6,820	6,582	6,770	6,852	7,123	6,776	6,864	6,994	6,738	6,783	6,790	7,137	6,877	6,923	6,949	6,884	7,076	6,877	6,904	6,920	6,782	7,032	6,844	6,879	»	
Perte de poids annuelle en grammes par décimètre carré.	1re année.	0,69	0,52	0,64	0,47	0,58	0,50	0,73	0,48	0,66	0,75	0,33	0,79	0,61	1,06	0,62	0,66	0,64	0,47	0,52	0,64	0,58	0,37	0,41	0,62	»	0,59	0,58
	2e année.	0,63	0,64	0,61	0,74	0,74	0,78	0,72	0,76	0,59	0,57	0,89	0,47	0,61	0,57	0,62	0,64	0,68	0,93	0,84	0,68	0,93	0,87	0,84	0,64	»	0,71	0,71
	Moyenne annuelle calculée sur la période entière.	0,66	0,58	0,63	0,61	0,66	0,64	0,73	0,62	0,63	0,66	0,61	0,63	0,61	0,82 Zn	0,62	0,65	0,66	0,70	0,68	0,66	0,76	0,62	0,63	0,63	»	0,65	0,65

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour faciliter la comparaison, les tôles de chaque catégorie sont groupées ensemble dans les tableaux 3 à 6, et on a conservé l'ordre relatif exact des tôles de chaque catégorie. Ainsi, dans le tableau 3, l'ordre 35-2, 13-3, 33-3, etc., est l'ordre exact dans lequel les tôles de fer forgé étaient placées dans leurs caisses, bien qu'entre chacune de ces tôles et sa voisine il y eût des tôles appartenant aux autres catégories de métaux.

§ 9. — **Pesées successives.** — A la fin de la première période de 315 jours, les tôles qui avaient été soumises à l'action de l'eau douce et de l'air atmosphérique furent retirées de leurs caisses, leur identité constatée, nettoyées soigneusement au jet de sable et pesées de nouveau dans les mêmes conditions que la première fois, puis réexposées de nouveau pendant une seconde période de 337 jours. Au bout de ce laps de temps, les tôles furent de nouveau sorties des caisses, nettoyées au jet de sable, pesées de nouveau, réintroduites dans leurs caisses et réexposées. La troisième période d'exposition est encore en cours.

Les tôles soumises à l'action de l'eau de mer furent immergées pendant 699 ou 700 jours; au bout de cette période, les caisses furent sorties de l'eau; on en retira les tôles, leur identité fut constatée, puis elles furent nettoyées avec des balais de fil de fer (le jet de sable n'étant pas accessible dans ce cas), pesées, réintroduites dans les caisses et immergées de nouveau dans l'eau de mer, où elles sont encore actuellement plongées, pour être retirées et repesées après une nouvelle période de temps.

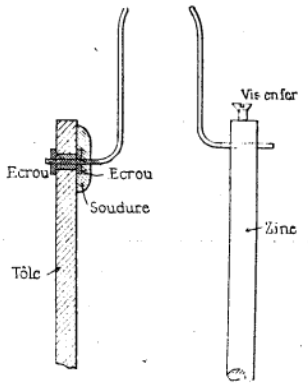


Fig. 4. — Connexion avec une tige de zinc.

§ 10. **État des caisses à la fin des essais.** — Les caisses soumises à l'action de l'air atmosphérique et les caisses immergées dans l'eau douce (eau de rivière) n'eurent à subir aucun changement pendant leurs deux périodes d'exposition.

La caisse I, immergée dans l'eau de mer, ne subit non plus aucun changement; mais la caisse II fut renversée sur le côté par suite de la rupture des crampons de fer qui la soutenaient. Il paraît que cet accident eut lieu pendant une violente tempête, environ 16 mois après l'immersion; mais, comme on n'était pas sûr du fait et que la perte de poids ne correspondait pas à cette date, je résolus d'éliminer les résultats de cette caisse, en ce qui concerne la rapidité de corrosion absolue, tout en tenant compte, au point de vue de la rapidité de corrosion relative, des différentes éprouvettes de tôle contenues dans la caisse.

§ 11. **Protection au moyen du zinc.** — Pour étudier jusqu'à quel point le contact avec du zinc métallique pourrait retarder la corrosion, un échantillon de tôle de chacune des quatre catégories exposées à l'air, et une tôle de chacune des quatre catégories immergées dans l'eau de rivière, furent reliés chacun à une petite tige de zinc du modèle de celles qu'on emploie dans la pile Leclanché ordinaire. Un morceau de fil de fer galvanisé n° 8 (fig. 4), fileté à l'une de ses extrémités, était introduit dans un petit trou pratiqué dans la tôle, fixé avec deux écrous et soudé ensuite. L'autre extrémité du fil de fer était ensuite introduite dans un trou pratiqué dans le couvercle de la caisse, puis dans le trou qui existe ordinairement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à l'extrémité des tiges de zinc Leclanché; on la fixait ensuite au moyen d'une vis de fixation en fer. La tige de zinc était solidement fixée à l'extérieur du couvercle de la caisse.

On employait, pour chacune des huit tôles ainsi disposées, un fil de connexion et une tige de zinc séparés, de manière à éviter tout contact électrique entre deux plaques.

§ **12.** — Les résultats des présentes recherches sont donnés en détail dans les tableaux 2 à 6. Le tableau 7 résume ces résultats et fournit les degrés de corrosion maximum, minimum et moyen pour chaque catégorie de métaux, dans les trois conditions d'exposition.

Le tableau 10 donne les degrés relatifs de corrosion des diverses catégories de métaux, comparés à celui du fer forgé.

Le tableau 14 donne la comparaison des degrés de corrosion pendant la première et la seconde année.

Le tableau 16 donne la comparaison du degré de corrosion dans l'eau de mer et dans l'eau douce, avec le degré de corrosion dans l'air atmosphérique.

Le tableau 17 indique l'influence sur le degré de corrosion de la connexion électrique avec le zinc métallique.

TABLEAU 7

Résumé des résultats.

(Non compris les tôles mises en connexion avec le zinc. Dans le cas de l'eau de mer, seulement, les résultats de la Caisse sont donnés ici.)

DÉSIGNATION DES MÉTAUX	PERTE DE POIDS ANNUELLE EN GRAMMES PAR DÉCIMÈTRE CARRÉ									
	EAU DE MER			EAU DOUCE			AIR ATMOSPHÉRIQUE			Moyenne générale
	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	
Première année.										
Fer forgé	»	»	»	7.27	5.90	6.54	2.35	1.78	2.10	4.51
Acier doux	»	»	»	6.73	5.71	6.20	2.49	2.03	2.23	4.22
Acier à 3 % de nickel	»	»	»	5.66	4.93	5.22	1.69	1.08	1.28	3.25
Acier à 26 % de nickel	»	»	»	1.88	1.50	1.66	0.79	0.35	0.58	1.12
Moyennes	»	»	»	5.38	4.50	4.93	1.83	1.31	1.55	3.23
Deuxième année.										
Fer forgé	»	»	»	6.39	5.66	6.00	2.57	1.79	2.21	4.10
Acier doux	»	»	»	5.76	4.98	5.51	2.55	1.88	2.20	3.87
Acier à 3 % de nickel	»	»	»	5.27	4.65	4.84	1.92	1.23	1.61	3.23
Acier à 26 % de nickel	»	»	»	2.71	1.73	2.26	0.93	0.48	0.71	1.49
Moyennes	»	»	»	5.03	4.25	4.65	1.99	1.34	1.68	3.17
Total des deux années.										
Fer forgé	11.03	5.22	9.67	6.69	5.91	6.25	2.31	1.98	2.16	6.00
Acier doux	12.69	9.76	11.52	6.15	5.42	5.86	2.51	1.96	2.22	6.54
Acier à 3 % de nickel	9.57	7.52	8.30	5.52	4.88	5.03	1.56	1.36	1.45	4.93
Acier à 26 % de nickel	3.37	2.63	2.88	2.21	1.61	1.97	0.76	0.59	0.65	1.83
Moyennes	9.18	6.30	8.10	5.08	4.46	4.78	1.79	1.47	1.62	4.83

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 8

Perte de poids annuelle de fer due à la corrosion en grammes par décimètre carré.

NUMÉROS D'ORDRE	NOMS des EXPÉRIMENTATEURS	DÉSIGNATION des MÉTAUX	NOMBRE D'ÉCHANTILLONS	CONDITIONS D'EXPÉRIENCES																												
				AIR ATMOSPHÉRIQUE	AIR ALTERNATIVEMENT HUMIDE ET SEC	AIR CHAUD ET HUMIDE	VAPEUR	EAU DE MER								EAU SALÉE		EAU DOUCE				EAU ALCALINE	EAU ACIDULÉE	BIÈRE	EAU DE MER FROIDE — CONTACT VOLTAÏQUE AVEC							
								FROIDE				CHAUDE				FROIDE	BOUILLANTE	FROIDE		CHAUDE												
								PURE				BOUILLANTE															DU FER FORGÉ POLI	DU FER RECOUVERT D'UNE COUCHE D'OXYDE	DU CUIVRE	DU BRONZE			
								non confinée	confinée	D'ÉGOUT	DE CALE	« Peninsular et Oriental » steamer	de chaudière avec zinc	de chaudière impure	PURE à 46° C.			DE RIVIÈRE, PURE	DE RIVIÈRE, IMPURE	D'ALIMENTATION	DE CHAUDIÈRE										
1	Mallet	Fonte fondue en sable	»	2,88	»	»	»	3,37	»	3,56	»	»	»	»	3,07	»	»	0,49	1,37	»	»	»	»	»	»	»	10,74	18,55				
2	—	— fondue en coquille	»	0,98	»	»	»	3,56	»	3,12	»	»	»	»	5,71	»	»	0,49	1,42	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
3	—	— planée	»	4,78	»	»	»	4,78	»	12,35	»	»	»	»	13,18	»	»	0,58	3,90	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
4	—	— peinte	»	0,63	»	»	»	4,00	»	6,73	»	»	»	»	2,34	»	»	0,49	2,93	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
5	—	Fer forgé, Standard	»	3,95	»	»	»	4,34	»	6,25	»	»	»	»	13,52	»	»	1,02	2,78	»	»	»	»	»	»	»	21,48	28,32				
6	—	— moyenne de 17	»	6,73	»	»	»	5,90	»	10,49	»	»	»	»	»	»	»	0,63	7,71	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
7	—	— galvanisée	»	»	»	»	»	1,90	»	4,29	»	»	»	»	»	»	»	0,24	2,00	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
8	—	Acier, moyenne de 7	»	5,71	»	»	»	5,22	»	10,45	»	»	»	»	»	»	»	0,63	6,10	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
11	Andrews	Fonte	»	»	»	»	»	»	1,71	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,76	4,20	5,96	»			
12	—	—	»	»	»	»	»	»	1,17	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,46	»	»	»			
13	—	Fer forgé	»	»	»	»	»	»	1,12	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	2,59	5,52	»			
14	—	—	»	»	»	»	»	»	0,93	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
15	—	Acier doux Bessemer	»	»	»	»	»	»	1,07	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,71	2,88	5,03	»			
16	—	— Martin	»	»	»	»	»	»	1,02	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,76	3,56	3,61	»			
17	—	— au creuset	»	»	»	»	»	»	1,51	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,76	3,95	5,32	»			
18	—	Acier dur Bessemer	»	»	»	»	»	»	1,32	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,76	2,93	5,42	»			
19	—	— Martin	»	»	»	»	»	»	1,17	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,51	3,71	5,71	»			
20	—	— au creuset	»	»	»	»	»	»	1,22	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
23	Parker	Acier doux Landore	»	10,06	»	»	»	10,15	»	»	23,44	11,42	5,86	32,52	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
24	—	— Brown	»	12,40	»	»	»	10,50	»	»	27,34	15,15	7,18	36,86	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
27	—	— Bolton	»	10,45	»	»	»	9,66	»	»	26,56	12,21	5,71	38,33	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
28	—	— Steel C° of Scotland	»	10,84	»	»	»	10,10	»	»	24,85	12,35	6,44	36,08	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
29	—	Fer forgé Taylor	»	8,25	»	»	»	8,20	»	»	23,19	8,01	2,98	29,73	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
30	—	— Leeds	»	7,57	»		»	9,66	»	»	25,73	9,32	3,22	32,08	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
31	—	— Bowling	»	7,32	»	»	»	10,98	»	»	25,29	9,42	2,54	29,20	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
32	—	— Farnley	»	8,15	»	»	»	8,44	»	»	27,98	10,59	3,37	34,57	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
33	—	— Lowmoor	»	8,10	»	»	»	10,35	»	»	26,32	10,20	4,25	29,15	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
»	—	— Parkhead ordinaire	»	7,61	»	»	»	9,27	»	»	20,26	9,52	2,83	27,64	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
»	—	— Skerne —	»	7,37	»	»	»	6,69	»	»	27,15	9,91	3,03	23,68	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
34	Gruner	Fonte noire Bessemer						71	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	967	»	»	»	»				
35	—	— grise phosphoreuse	»	14 à 18	»	»	»	101	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	541	»	»	»	»				
36	—	— Spiegeleisen						142	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	91	»	»	»	»				
37	—	— au bois						»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	49	»	»	»	»				
38	—	Acier doux							»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	6 à 24	»	»	»	»				
39	—	Acier doux	»	27 à 36	»	»	»	20 à 41	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	49 à 67	»	»	»	»				
40	—	Acier manganésé recuit							»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	97	»	»	»	»				
41	—	— — trempé							»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	249	»	»	»	»				
42	Farquharson	Fer forgé	»	»	»	»	»	5,76	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	10,74	»	»	»			
43	—	Acier doux	»	»	»	»	»	6,15	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	2,24	»	»	»			
44	Moyennes de Thwaite	Fer forgé	»	6,73	»	»	»	5,91	»	10,50	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
45		Aciers divers	»	6,71	»	»	»	5,22	»	10,45	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
46		Fonte	»	2,64	»	»	»	3,42	»	3,51	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				
47		— galvanisée	»	1,07	»	»	»	1,90	»	4,29	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»				

TABLEAU 8

Perte de poids annuelle du fer due à la corrosion en grammes par décimètre carré.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 8 (*suite*)

Perte de poids annuelle de fer due à la corrosion en grammes par décimètre carré (*suite*).

NUMÉROS D'ORDRE	NOMS des EXPÉRIMENTATEURS	DÉSIGNATION des MÉTAUX	NOMBRE D'ÉCHANTILLONS	CONDITIONS D'EXPÉRIENCES																									
				AIR ATMOSPHÉRIQUE	AIR ALTERNATIVEMENT HUMIDE ET SEC	AIR CHAUD ET HUMIDE	VAPEUR	EAU DE MER								EAU SALÉE		EAU DOUCE				EAU ALCALINE	EAU ACIDULÉE	BIÈRE	EAU DE MER FROIDE — CONTACT VOLTAÏQUE AVEC			
								FROIDE			CHAUDE																		
								PURE			BOUILLANTE							FROIDE		CHAUDE									
								non confinée	confinée (alternée avec exposition à l'air)	D'ÉGOUT	DE CALE	P. & O. steamer	de chaudière avec zinc	de chaudière impure	PURE à 46° C.	FROIDE	BOUILLANTE	DE RIVIÈRE, PURE	DE RIVIÈRE, IMPURE	D'ALIMENTATION	DE CHAUDIÈRE				DU FER FORGÉ POLI	DU FER RECOUVERT D'UNE COUCHE D'OXYDE	DU CUIVRE	DU BRONZE
1	Krupp (3 ans 1/2).	Acier doux.	1	4,92	»	5,17	»	»	5,67	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,49	»	»	»	»	»	»	»	»
2	—	— —	1	4,68	»	5,06	»	»	5,67	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,35	»	»	»	»	»	»	»	»
3	—	— —	1	4,44	»	5,29	»	»	5,42	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,23	»	»	»	»	»	»	»	»
4	—	— —	1	5,29	»	5,06	»	»	5,17	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,23	»	»	»	»	»	»	»	»
5	—	— —	1	3,58	»	7,40	»	»	5,05	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,49	»	»	»	»	»	»	»	»
6	—	— —	1	3,46	»	7,25	»	»	4,68	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,11	»	»	»	»	»	»	»	»
7	—	— —	1	4,19	»	6,40	»	»	4,31	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,23	»	»	»	»	»	»	»	»
8	—	— —	1	4,81	»	5,67	»	»	5,17	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,23	»	»	»	»	»	»	»	»
9	—	— —	1	4,56	»	5,42	»	»	9,74	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,23	»	»	»	»	»	»	»	»
10	—	— —	1	4,81	»	7,90	»	»	5,17	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,11	»	»	»	»	»	»	»	»
11	—	— —	1	3,70	»	7,77	»	»	4,92	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,98	»	»	»	»	»	»	»	»
12	—	— —	1	3,83	»	9,11	»	»	5,55	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,11	»	»	»	»	»	»	»	»
		Moyenne.	12	4,35	»	6,46	»	»	5,54	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,23	»	»	»	»	»	»	»	»
13	—	Acier à ressorts.	1	3,94	»	10,20	»	»	5,05	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,86	»	»	»	»	»	»	»	»
14	—	— —	1	3,57	»	10,00	»	»	4,92	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,98	»	»	»	»	»	»	»	»
15	—	— —	1	5,54	»	10,35	»	»	6,91	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,86	»	»	»	»	»	»	»	»
16	—	— —	1	4,56	»	9,49	»	»	5,55	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,98	»	»	»	»	»	»	»	»
		Moyenne.	4	4,41	»	10,01	»	»	5,61	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,93	»	»	»	»	»	»	»	»
17	—	Fer forgé.	1	4,44	»	8,62	»	»	5,68	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,98	»	»	»	»	»	»	»	»
18	—	—	1	5,29	»	8,13	»	»	5,68	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,11	»	»	»	»	»	»	»	»
19	—	—	1	5,09	»	8,88	»	»	6,41	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,74	»	»	»	»	»	»	»	»
20	—	—	1	4,93	»	7,03	»	»	5,91	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,23	»	»	»	»	»	»	»	»
21	—	—	1	5,17	»	8,99	»	»	6,77	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,74	»	»	»	»	»	»	»	»
22	—	—	1	4,68	»	7,27	»	»	5,67	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,86	»	»	»	»	»	»	»	»
		Moyenne.	6	5,03	»	8,15	»	»	6,02	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0,94	»	»	»	»	»	»	»	»
1	Krupp (10 ans).	Acier doux.	1	3,51	»	4,52	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
2	—	— —	1	3,48	»	5,96	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
3	—	— —	1	3,48	»	7,03	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
4	—	— —	1	4,08	»	5,25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
5	—	— —	1	3,21	»	6,43	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
6	—	— —	1	3,08	»	5,42	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
7	—	— —	1	3,65	»	6,50	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
8	—	— —	1	4,52	»	4,95	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
9	—	— —	1	3,45	»	5,06	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
10	—	— —	1	3,48	»	6,36	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
11	—	— —	1	2,34	»	6,70	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
12	—	— —	1	2,88	»	5,42	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		Moyenne.	12	3,43	»	5,80	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
13	—	Acier à ressorts.	1	2,68	»	7,13	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
14	—	— —	1	2,81	»	6,33	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
15	—	— —	1	3,82	»	7,97	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
16	—	— —	1	3,45	»	8,07	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		Moyenne.	4	3,19	»	7,37	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

TABLEAU 8 (*suite*)

Perte de poids annuelle de fer due à la corrosion en grammes par décimètre carré (*suite*).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 8 (*suite*)

Perte de poids annuelle du fer due à la corrosion en grammes par décimètre carré (*suite*).

NUMÉROS D'ORDRE	NOMS des EXPÉRIMENTATEURS	DESIGNATION des MÉTAUX	NOMBRE D'ÉCHANTILLONS	CONDITIONS D'EXPÉRIENCES																											
				AIR ATMOSPHÉRIQUE	AIR ALTERNATIVEMENT HUMIDE ET SEC	AIR CHAUD ET HUMIDE	VAPEUR	EAU DE MER								EAU SALÉE		EAU DOUCE				EAU ALCALINE	EAU ACIDULÉE	BIÈRE	EAU DE MER FROIDE — CONTACT VOLTAÏQUE AVEC			
								FROIDE				CHAUDE				FROIDE	BOUILLANTE	FROIDE		CHAUDE									
								PURE				BOUILLANTE																	
								non confinée	confinée	D'ÉGOUT	DE CALE	P. & O. steamer	échantillons avec zinc	échantillons impure	PURE à 46° C.			DE RIVIÈRE, PURE	DE RIVIÈRE, IMPURE	D'ALIMENTATION	DE CHAUDIÈRE				DU FER FORGÉ POLI	DU FER RECOUVERT D'UNE COUCHE D'OXYDE	DU CUIVRE	DU BRONZE
17	Krupp (10 ans).	Fer forgé.	1	4,15	»	6,59	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
18	—	—	1	4,32	»	6,10	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
19	—	—	1	»	»	6,10	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
20	—	—	1	3,78	»	6,30	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
21	—	—	1	4,39	»	6,63	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
22	—	—	1	4,55	»	5,56	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		Moyenne.	6	4,24	»	6,21	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	Howe	Fer forgé.	»	2,16	»	»	»	9,66	»	»	»	»	»	»	»	»	»	6,25	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	—	Acier au carbone.	»	2,22	»	»	»	11,52	»	»	»	»	»	»	»	»	»	5,86	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	—	— à 3 % de nickel.	»	1,45	»	»	»	8,30	»	»	»	»	»	»	»	»	»	5,03	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	—	— à 26 % —	»	0,65	»	»	»	2,88	»	»	»	»	»	»	»	»	»	1,97	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	Carnegie.	Fer forgé.	3	»	»	»	3,44	»	2,86	»	»	»	»	»	»	2,77	11,19	4,29	»	»	»	»	214,12	22,83	»	»	»	»	»
»	—	Acier Bessemer.	1	»	»	»	3,01	»	3,21	»	»	»	»	»	»	2,93	13,18	4,43	»	»	»	»	35,00	17,08	»	»	»	»	»
»	—	— Martin.	2	»	»	»	5,21	»	3,05	»	»	»	»	»	»	2,69	10,85	4,01	»	»	»	»	166,02	26,97	»	»	»	»	»
»	—	— au nickel.	1	»	»	»	2,43	»	3,11	»	»	»	»	»	»	2,69	6,65	4,37	»	»	»	»	30,38	8.99	»	»	»	»	»
»	Wheeling.	Fer forgé.	2	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	86,33	»	»	»	»	»	»
»	—	Acier doux.	2	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	273,05	»	»	»	»	»	»
»	Adamson.	Fer forgé.	3	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	3049,43	»	»	»	»	»	»
»	—	Acier doux.	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	233,65	»	»	»	»	»	»
»	—	— demi-dur.	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	763,21	»	»	»	»	»	»
»	Varona.	Fer forgé.	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	2,31	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	—	Fonte.	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	2,53	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	—	Acier.	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	2,94	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

DISCUSSION DES RÉSULTATS

§ 13. Comparaison du fer forgé et de l'acier doux. — Examinons d'abord les résultats obtenus par l'auteur et considérons ensemble les deux années (tableau 7); l'acier doux se corrode un peu plus vite (17 %)[1] que le fer forgé dans l'eau de mer, un peu plus lentement (6 %) que le fer forgé dans l'eau douce, et très peu plus vite (3 %) que le fer forgé dans l'air atmosphérique. Si l'on prend la moyenne générale de tous les essais, on trouve que l'acier se corrode très peu plus vite que le fer forgé, mais la différence $\left(4{,}7\,\% = \frac{17 - 6 + 3}{3}\right)$ est si légère qu'elle est négligeable dans la plupart des cas.

1. Donnant un poids de 11 et 12 respectivement aux rapports moyennes 1,19 : 1 et 1,16 : 1 de la corrosion de l'acier doux à celle du fer dans les caisses I et II, parce que caisse I contient 11 et caisse II contient 12 planches.

TABLEAU 8 (*suite*)

Perte de poids annuelle de fer due à la corrosion en grammes par décimètre carré (*suite*).

Nous nous demanderons d'abord si ces divergences sont dues, d'une part, aux propriétés particulières individuelles des échantillons essayés ou à des variations accidentelles dans leur état, ou, d'autre part, si elles représentent des différences intrinsèques réelles, bien que légères, dans la corrodabilité relative de ces deux catégories de métaux. Si cette dernière hypothèse est exacte, dans des conditions d'exposition données la différence entre le fer forgé et l'acier devrait être à peu près constante, au moins en signe. La première question qui se pose est de savoir quel est le degré de constance de la différence entre le fer forgé et l'acier dans des conditions données. Pour répondre à cette question, nous devons examiner en détail les résultats des expériences, et comparer mes résultats avec ceux des expérimentateurs qui ont opéré avant moi (voir tableau 9).

Dans l'eau de mer froide, 9 de mes 11 tôles d'acier se sont corrodées plus rapidement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 9

Effets de la corrosion sur l'acier exprimés en centièmes des effets de la corrosion sur le fer forgé.

TABLEAU 9

Effets de la corrosion sur l'acier exprimés en centièmes des effets de la corrosion sur le fer forgé.

NUMÉROS D'ORDRE	NOMS des EXPÉRIMENTATEURS	NOMBRE D'ÉCHANTILLONS (fer forgé) pour chaque série	NOMBRE D'ÉCHANTILLONS (acier) pour chaque série	CONDITIONS D'EXPÉRIENCES — AIR ATMOSPHÉRIQUE	AIR ALTERNATIVEMENT HUMIDE ET SEC	AIR CHAUD ET HUMIDE	VAPEUR	EAU DE MER — FROIDE — PURE — non confinée	EAU DE MER — FROIDE — PURE — confinée	EAU DE MER — FROIDE — D'ÉGOUT	EAU DE MER — FROIDE — DE CALE	EAU DE MER — BOUILLANTE — DE CHAUDIÈRE DU "P. & O." STEAMER	EAU DE MER — BOUILLANTE — DE CHAUDIÈRE AVEC ZINC	EAU DE MER — BOUILLANTE — DE CHAUDIÈRE IMPURE	EAU SALÉE — FROIDE	EAU SALÉE — BOUILLANTE	EAU DOUCE — FROIDE — DE RIVIÈRE, PURE	EAU DOUCE — FROIDE — DE RIVIÈRE, IMPURE	EAU DOUCE — CHAUDE — D'ALIMENTATION	EAU DOUCE — CHAUDE — DE CHAUDIÈRE	EAU DE MER FROIDE — CONTACT VOLTAÏQUE AVEC — DU FER FORGÉ POLI	DU FER RECOUVERT D'UNE COUCHE D'OXYDE	DU CUIVRE	DU BRONZE	EAU ALCALINE	EAU ACIDULÉE	BIÈRE	MOUT	"HOPJACK"	SABLE ARGILLACIEUX avec $NaNO^3$, Na^2CO^3 + NH^4Cl
	A. — Aciers durs et demi-durs.																													
1	Mallett	18	7	86,7	»	»	»	90	»	102	»	»	»	»	»	»	103	82	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
2	Andrews	2	4	»	»	»	»	»	127	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
3	Andrews	1	2	»	»	»	»	»	125	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
4	Adamson	3	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	24	»	»	»
5	Adamson	3	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	29	»	»	»
6	Ledebur	?	?	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	75	»	»	»
7	Krupp (1289 jours, Acier à ressorts)	6	4	87,6	»	122,7	»	»	93,2	»	»	»	»	»	»	»	»	»	98,5	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
8	Krupp (10 ans, Acier à ressorts)	6	4	75,3	»	118,7	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	B. — Aciers doux.																													
9	Andrews	2	2	»	»	»	»	»	102	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
10	Parker	7	4	141	»	»	»	111	»	»	101	134	198	122	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
11	Farquharson	3	3	»	»	»	»	107	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
12	Adamson	3	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	9	»	»	»
13	Adamson	3	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	14	»	»	»
14	Boies	1	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	120	»	»	»
15	Bonifacius	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	98	»	»	»
16	Wheeling	1	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	34	»	»	»
17	Wheeling	1	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	29	»	»	»
18	Gautier	»	»	»	»	»	42,9			»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
19	Carnegie	3	3	»	»	»	109	»	110	»	»	»	»	»	103	111	100	»	»	»	»	»	»	»	»	»	37	»	»	»
20	Carnegie	2	4	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	83	»	»	»	»	»	»	»	»	176	75	33	40	61	»
21	Williams	1	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	87
22	Varona	1	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	127	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
23	Krupp (3 ans 1/2)	6	12	86,5	»	78,2	»	»	92,1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	131	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
24	Krupp (10 ans)	6	12	80,7	»	93,3	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
25	Howe — 1re période	6	6	107	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	95	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	Howe — 2e période	6	6	99	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	92,3	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	Howe — Période totale	6	6	103	»	»	»	117	»	»	»	»	»	»	»	»	93,7	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
		ACIER AU NICKEL	ACIER DOUX	Perte de poids par corrosion de l'acier au nickel exprimée en centièmes de la perte de poids de l'acier doux.																										
26	Carnegie	1	3	»	»	»	66	»	98	»	»	»	»	»	93	54	102	»	»	»	»	»	»	»	»	»	39	48	»	»	»
27	Carnegie	1	4	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	135	»	»	»	»	»	»	»	»	50	90	»	31	59	»
28	Howe. Acier à 3 % de Ni	12	11 à 12	67	»	»	»	81	»	»	»	»	»	»	»	»	80	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
29	Howe. — 26 % —	12 à 24	11 à 12	30	»	»	»	34	»	»	»	»	»	»	»	»	32	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

1. Rept British Ass. 1840 et 1843. — 2-3. Andrews, *Proc. Inst. Civ. Engineers*, 1885, LXXXII, p. 281. — 4-5. Adamson, *Journ. Iron and Steel Inst.*, 1878, II, p. 398. — 6. Ledebur, *Berg und Hütten Zeitung*, 1877, p. 280. — 7-8. Krupp, *Stahl und Eisen*, 1er août 1896, XVI. — 9. Andrews, *loc. cit.* — 10. Parker, *Journ. Iron and Steel Inst.*, 1881, I, p. 39. — 11. Farquharson, *ibid.*, 1882, I, p. 204. — 12-13. Adamson, *loc. cit.* — 14. Renseignement particulier. — 15. *Iron Age*, 18 août 1887, p. 22. — 16-17. *Ibid.*, XLI, p. 518. — 18. "Steel" J.-S. Jeans, 1880, p. 744. — 19-20. Report Dept of City Works for 1894, Brooklyn, N. Y. 1895, p. 101-104. — 21. *Iron Age*, XLVII, p. 1109. — 22, 26-27. Report Dept City Works, *loc. cit.* — 23-24. Krupp, *loc. cit.* — 25, 28-29. Voir présent rapport.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 10

Effets relatifs moyens de la corrosion sur les différents métaux soumis aux essais, exprimés en centièmes des effets de la corrosion sur le fer forgé.

(Non compris les tôles mises en connexion avec des tiges de zinc.)

DÉSIGNATION DES MÉTAUX	EAU DE MER			EAU DOUCE	AIR ATMOSPHÉRIQUE	MOYENNES
	CAISSE I	CAISSE II	CAISSE I ET II			
Fer forgé.	100	100	100	100	100	100
Acier doux	119	116	117	94	103	105
Acier à 3,18 0/0 de nickel. . . .	86	77	81	80	67	76
Acier à 26,441 0/0 de nickel. . .	30	38	34	32	30	32

que la moyenne des tôles de fer forgé correspondantes[1]. Dans les deux autres cas, l'acier s'est moins corrodé que le fer forgé, mais la différence est légère. Dans cette série d'essais, le degré de permanence dans la différence entre le fer forgé et l'acier est donc suffisant pour tendre fortement à prouver que la supériorité des tôles de fer forgé considérées, dans les conditions de l'expérience, pour faible qu'elle soit, environ 17 %, est cependant réelle et non simplement apparente.

Dans l'eau douce, sur 11 cas comparables[2], les tôles d'acier se sont moins corrodées que la moyenne des tôles de fer forgé dans 9 cas pour la première année et dans tous les cas pour la seconde année, ainsi que pour la période totale des deux années considérées conjointement. Ici également, la permanence du signe de la différence est telle que l'on peut soutenir avec quelque raison que la légère supériorité des tôles d'acier soumises à l'action de l'eau froide (environ 6 %), de même que celle des tôles de fer forgé dans l'eau de mer, n'est pas simplement apparente, mais réelle.

En ce qui concerne l'action de l'air atmosphérique, le nombre de tôles d'acier dont le degré de corrosion est supérieur à celui de la moyenne des tôles de fer forgé est de 7 sur 11, pendant la première année, et de 5 sur 11 seulement, pendant la seconde année; bien que pour les deux années considérées en bloc le résultat soit de 9 sur 11, la différence est très faible pour 6 de ces 9 tôles. Dans ce cas, la divergence entre les deux métaux est si légère qu'elle n'indique pas une réelle différence dans la corrodabilité entre le fer et l'acier; on doit plutôt l'attribuer, soit à des propriétés particulières individuelles des tôles soumises aux essais, soit à de légères variations dans les conditions d'expérience qui m'auraient échappé.

Maintenant comparons ces résultats avec ceux d'autres investigateurs, comme ils sont groupés dans les tableaux 8 et 9.

Dans l'eau de mer froide, bien que, chose frappante, dans les expériences de Parker, de Farquharson et de Carnegie, l'oxydation de l'acier doux surpasse celle du fer forgé d'une quantité à peu près égale à celle qu'indiquent mes essais, cependant, d'après les expériences d'Andrews, l'oxydation des deux métaux est à peu près égale, tandis que dans celles de Krupp, l'oxydation de l'acier est inférieure à l'oxydation moyenne des tôles de fer forgé[3] dans 11 cas sur 12; la supériorité de son acier sur son fer forgé est donc à peu près aussi constante que l'infériorité de l'acier que j'ai étudié par rapport à mon fer forgé.

1. La période réelle de corrosion étant plus longue pour la caisse n° 1 que pour la caisse n° 2, on n'a comparé entre elles que des tôles placées dans la même caisse. Le rapport du degré de corrosion de l'acier doux à celui du fer forgé que nous donnons ici (117 %) est déduit de la corrosion relative dans les deux caisses considérées séparément.

2. On a éliminé de la comparaison les tôles reliées à des tiges de zinc.

3. Dans les expériences de Gautier, l'acier s'est également beaucoup moins corrodé que le fer forgé, mais, comme je n'ai pu trouver les détails de ces expériences, je ne puis leur attribuer grand poids pour ce calcul-ci.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans l'eau douce froide, les aciers doux de Carnegie, de même que celui que j'ai étudié, se sont toujours moins oxydés que le fer forgé correspondant. Le contraire s'est produit dans les essais de Varona, mais, comme ils n'ont porté que sur un seul échantillon de chaque catégorie, ils n'ont pas grande autorité.

Dans l'air atmosphérique, l'oxydation de l'acier doux est bien plus faible que celle du fer forgé, d'après les expériences de Krupp; dans mes essais, l'oxydation est à peu près la même pour les deux métaux, tandis que, dans les expériences de Parker, l'oxydation de l'acier doux est beaucoup plus grande que celle du fer forgé.

TABLEAU 11

Effets relatifs de la corrosion sur l'acier doux et sur le fer forgé.

(Perte de poids due à l'effet de la corrosion sur l'acier doux, exprimée en centièmes de la perte de poids du fer forgé et établie d'après les indications du tableau 9 avec l'indication de la constance de signe.)

OBSERVATEURS	EAU DE MER FROIDE	EAU DOUCE FROIDE	AIR ATMOSPHÉRIQUE
Andrews	102 C	»	»
Parker	111 U	»	141, très constant
Farquharson	107 U	»	»
Carnegie	110 C	100 et 83	»
Krupp	92 C, à peu près constant	»	83,5 et 80,7, très constant
Howe	117 U, à peu près constant.	93,7, à peu près constant.	103, pas constant.

C = confiné. | U = non confiné.

§ 14. Conclusions générales. — Les résultats sont réunis dans le tableau 11. En considérant, d'une manière générale, leur degré de constance, nous faisons trois généralisations.

1° Dans ces conditions d'expériences, il n'y a pas de différence très marquée, au point de vue de l'effet moyen de la corrosion, entre le fer forgé et l'acier doux, sauf que (1) dans les essais de Gautier, l'acier s'est beaucoup moins corrodé que le fer forgé, pour des raisons qui me sont inconnues, et que, en somme, l'acier ne compare pas si favorablement avec le fer forgé dans l'eau de mer que dans l'eau douce. Nous étudierons plus loin (§§ 19 et 20) les effets de la corrosion dans l'eau de mer bouillante et dans d'autres conditions spéciales.

2° Sur certains lots d'échantillons de fer forgé et d'acier doux, la corrosion peut produire, dans des conditions variables, des effets relatifs très variables (comparer les résultats de Parker pour l'eau de mer et pour l'air atmosphérique), même si variables, que certains aciers doux, qui, dans certaines conditions, se corrodent presque constamment plus vite que certains fers forgés, peuvent, dans d'autres conditions, s'oxyder plus lentement que ces mêmes fers forgés, le phénomène se produisant avec la même constance (voir Howe, eau de mer et eau douce).

3° Dans des conditions se ressemblant, d'une manière générale, certains aciers doux se corrodent plus vite et d'autres plus lentement que certains fers forgés (pour l'immersion dans l'eau de mer, comparer les résultats de Krupp à ceux de Parker, de Farquharson, de Carnegie et de Howe; pour l'exposition à l'air atmosphérique, comparer les résultats de Parker à ceux de Krupp).

§ 15. Explication des variations observées. — De ces variations et des divergences que nous notons dans chaque groupe d'expériences, trois causes sont apparentes :

1° Les variations quasi accidentelles, petites variations de la classe qui est cause que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la rouille forme des taches en certains points d'une lame de couteau en apparence homogène, tandis que le reste de la lame demeure poli, bien que toute la lame paraisse soumise à des conditions d'exposition absolument identiques.

A cette catégorie appartiennent les variations dans la composition, dans le traitement préalable thermal ou mécanique, dans l'état de la surface, et les variations dans les conditions d'exposition qui échappent à l'observation.

Les effets de cette cause doivent tendre à disparaître d'eux-mêmes quand on considère la moyenne d'un grand nombre de cas.

2° Une différence entre le fer forgé en général et l'acier doux en général, au point de vue de leur tendance à l'oxydation : une différence dont la nature est telle qu'en moyenne le fer forgé se corrode plus rapidement dans certaines conditions d'exposition et plus lentement dans d'autres conditions, que l'acier doux considéré en moyenne.

Les effets de cette cause doivent tendre à être masqués par ceux de la cause précédente quand on ne considère qu'un petit nombre de cas, mais ils doivent être mis nettement en évidence quand on prend la moyenne d'un grand nombre de cas. On trouvera au paragraphe 22 une explication de cette cause.

3° Une différence dans la faculté de s'oxyder qu'offrent les divers lots de fer forgé relativement à celle des aciers doux choisis par des expérimentateurs différents. Ainsi une comparaison entre l'acier doux et le fer forgé serait beaucoup plus favorable à l'acier dans chacune des expériences de Krupp que dans les miennes. Ce fait résulte peut-être de ce que les fers forgés de Krupp ont une teneur plus élevée que les miens en carbone et en manganèse (voir § 18), ou bien de la supériorité de son acier sur le mien.

§ 16. Première cause. — L'existence de la première cause ne peut être mise en doute. Les résultats obtenus par Krupp dans ses essais avec l'eau de mer en fournissent un effet frappant. La perte moyenne annuelle, par oxydation, de ses douze tôles d'acier doux (de six catégories différentes d'acier doux) était de $5^{gr},54$ par décimètre carré. Cependant, avec deux tôles du même acier, on a obtenu après corrosion, dans un cas, une perte de $9^{gr},74$ par décimètre carré, c'est-à-dire environ le double de n'importe laquelle des autres, et, dans l'autre cas, une perte de $5^{gr},17$ qui est actuellement moins que la moyenne. Or, la seule différence apparente entre ces tôles était que l'une avait été recuite ; l'examen interne montre que cette cause ne peut produire un tel effet, car une telle différence n'existe pas entre les éprouvettes recuites et non recuites de fer forgé et les autres aciers doux essayés par Krupp. On trouvera un autre exemple au paragraphe 1. En étudiant les résultats obtenus par l'auteur, on voit combien il est important, au point de vue de la première cause de divergences, que nos expériences portent sur un grand nombre d'éprouvettes, ou au moins sur une grande surface de métal. Si nous n'avions, par exemple, exposé qu'une seule tôle chacune d'acier doux et de fer forgé, nous aurions pu trouver, d'une part, que l'acier doux se corrode (1) 2,3 fois aussi vite, ou (2) 2 fois aussi vite, ou (3) moins de 0,66 fois aussi vite que le fer forgé, suivant que nous aurions considéré la tôle 105-3 avec la tôle 15-1, ou la tôle 108-2 avec la tôle 14-3, ou la tôle 106-1 avec la tôle 53-3. Mais, comme chaque caisse à claire-voie contenait un grand nombre de tôles de grandes dimensions, ces différences disparaissent dans la moyenne, de sorte qu'en fait le rapport des effets moyens de la corrosion sur l'acier doux et sur le fer forgé est sensiblement le même dans les deux caisses, c'est-à-dire $\frac{1,19}{1}$ dans la caisse I et $\frac{1,16}{1}$ dans la caisse II.

§ 17. Seconde cause. — Je vais maintenant exposer pourquoi je considère comme très importante la seconde des causes ci-dessus. En comparant les résultats obtenus par divers observateurs (voir tableau 9), je fus frappé par ce fait que, à une seule exception près, chacune des catégories de conditions dans lesquelles j'ai groupé les résultats, à savoir : air

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

atmosphérique, eau de mer confinée, eau de rivière pure, etc., était, en réalité, loin d'être constante. En ce qui concerne l'eau de mer confinée, il y a de grandes différences entre les expériences faites par deux observateurs différents, suivant la proportion qui existe entre le volume d'eau de mer employé et le volume du fer immergé, suivant la fréquence des renouvellements de l'eau de mer, suivant la température de la pièce, etc. Les eaux de deux rivières peuvent différer beaucoup au point de vue de la quantité de résidus d'égout, d'acide humique et de sels divers qu'elles renferment, ainsi qu'au point de vue de la température, et peut-être aussi de la quantité d'oxygène dissous. Il peut en être de même pour l'air[1]. Mais le cas de l'eau de mer non confinée diffère beaucoup de ceux-ci, car nous avons une moyenne beaucoup plus constante au point de vue de la température, de la pureté et de la composition chimique.

Ainsi, tandis que l'effet de la corrosion sur le fer forgé relatif à celui sur l'acier doux varie considérablement dans l'une quelconque des conditions considérées (air atmosphérique, eau de rivière, eau de mer confinée) qui, bien que groupées ici ensemble, ne sont pas réellement constantes, cependant l'effet de la corrosion varie très peu dans les trois essais distincts faits avec l'eau de mer non confinée[2].

Ainsi, d'après les résultats de Parker, de Farquharson et d'après les miens, l'effet de la corrosion sur l'acier doux dans l'eau de mer non confinée était de 111 %, 107 % et 117 % respectivement, par rapport à celui du fer forgé. La différence entre ces résultats est remarquablement légère[3], surtout eu égard aux grandes différences qui existent entre les résultats

1. La différence extraordinaire qui existe entre des conditions d'expériences soi-disant identiques peut se constater, même par un examen rapide des résultats. Ainsi, dans le cas de l'exposition à l'action de l'air atmosphérique, l'effet de la corrosion sur le fer forgé a été plus de trois fois plus rapide dans les expériences de Mallet et de Parker que dans les miennes (tableau 8). La perte de poids annuelle était de 6gr,73 par décimètre carré dans les expériences de Mallet, de 7gr,32 à 8gr,25 par décimètre carré dans les expériences de Parker et de 2gr,16 dans mes essais. Cette différence, qui paraît extraordinaire à première vue, s'explique facilement, si l'on réfléchit que leur « air atmosphérique » était respectivement la fumée sulfureuse de Dublin et de Londres, tandis que le mien était l'air pur de la campagne à High Bridge. De plus, Mallet trouvait que le fer forgé immergé dans l'eau pure de la Liffey ne perd que 0gr,63 par décimètre carré et par an, tandis que j'ai trouvé une perte de 6gr,25, c'est-à-dire environ 10 fois autant dans l'eau apparemment pure de la Raritan. La perte était presque aussi grande que celle qu'a trouvée Mallet dans l'eau de la Liffey, après qu'elle a été polluée par les eaux d'égout de Dublin, c'est-à-dire 7gr,71.

2. Je fus d'abord très frappé de ce fait que les aciers de Parker comparent plus favorablement avec ses fers forgés dans l'eau de mer que lorsqu'ils sont exposés à l'air; le contraire a lieu avec les aciers de Krupp et ceux de l'auteur lorsqu'ils sont comparés avec leurs fers forgés.

La première déduction que je tirai de ces remarques fut que la marche de ces phénomènes tendait à faire admettre une loi suivant laquelle « De deux catégories d'expositions, l'une peut être plus favorable à certains aciers doux comparés à certains fers forgés, tandis que l'autre peut être plus favorable à certains autres aciers comparés à certains autres fers forgés. » Cependant, si je considère : 1° combien grandes peuvent être les variations de l'air atmosphérique au point de vue de la température, du degré hygrométrique, de la chute de pluie, de la richesse en chlorures, en acide sulfurique, en ozone, etc., etc.; 2° l'accord entre le rapport des effets de la corrosion sur le fer forgé et sur l'acier doux, accusés par les résultats des expériences de Parker, de celles de Farquharson et des miennes propres, dans les conditions presque uniformes que présente l'eau de mer non confinée, je ne pourrai pas trouver pour cette loi une base solide; j'attribuerai plutôt aux différences d'état de l'atmosphère la différence des effets de la corrosion sur le fer forgé et sur l'acier doux qui existe entre les résultats de mes expériences et de celles de Parker et de Krupp.

3. Le fait que la rapidité absolue de la corrosion est plus constante dans l'eau de mer que dans les autres conditions est en accord avec cette idée de la constance du rapport de la corrosion de l'acier à celle du fer dans l'eau de mer. En particulier, les résultats obtenus avec ma caisse n° I concordent très exactement avec les résultats complets de Parker, comme le montre le tableau suivant :

TABLEAU 12

Perte moyenne de poids dans l'eau de mer non confinée en grammes par décimètre carré.

(Extrait du tableau 8.)

OBSERVATEURS	FER FORGÉ	ACIER PEU CARBURÉ
Parker	9.08	10.10
Howe	9.66	11.52
Mallet	5.90	»
Farquharson	5.76	6.15

Le fait le plus intéressant est que, quand la rapidité de corrosion absolue est changée, comme cela est arrivé pour la caisse 2 de l'auteur qui a été renversée et retournée, le rapport des effets de la corrosion sur le fer forgé et sur l'acier doux reste à peu près constant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des mêmes expérimentateurs opérant dans des conditions différentes, et à la grande constance de signe des résultats obtenus pour l'eau de mer par Parker et par l'auteur lui-même. Chacun des quatre échantillons d'acier doux essayés par Parker se corrode plus que la moyenne de ses sept fers forgés, et 9 sur 11 de mes tôles d'acier doux se corrodent plus vite que la moyenne de mes 12 tôles de fer forgé.

De plus, bien que le degré absolu de corrosion fût plus que double dans ma caisse I que dans ma caisse II, cependant, comme je viens de le faire remarquer, le rapport des effets de la corrosion était presque exactement le même dans les deux caisses, c'est-à-dire $\frac{1}{1,19}$ pour l'une et $\frac{1}{1,16}$ pour l'autre.

En résumé, de ce fait que, quand les conditions sont très approximativement constantes (eau de mer froide non confinée), l'effet de la corrosion sur l'acier doux est presque constamment très légèrement supérieur à l'effet de la corrosion sur le fer forgé, je conclus qu'il existe bien une différence intrinsèque, très légère, il est vrai, entre les deux catégories de métaux au point de vue des effets que produit sur eux la corrosion. De cet autre fait, que, quand les conditions diffèrent, les effets relatifs de la corrosion sur ces mêmes séries d'échantillons de tôles de fer forgé et d'acier varient non seulement beaucoup en valeur absolue, mais aussi de signe, je conclus que cette différence dans l'aptitude à se corroder varie elle-même beaucoup avec les conditions d'exposition.

§ 18. **Troisième cause.** — La plupart des variations dans les effets relatifs de la corrosion sur l'acier doux et sur le fer forgé que révèle le tableau 9 peuvent être attribuées aux deux causes que nous venons d'étudier (1), variations quasi accidentelles et (2) variations dans les conditions d'exposition, favorisant quelquefois le fer forgé, quelquefois l'acier doux; mais le degré et la constance de la supériorité à cet égard de l'acier sur le fer forgé sont tellement plus grands dans les résultats de Krupp que dans les autres séries extensives des expériences, que l'on peut croire que son acier possède actuellement une supériorité sur son fer, qui n'existe pas dans les matériaux des autres observateurs.

Ainsi, si l'on élimine les conditions d'expériences anormales telles que haute température, bain acide ou alcalin, les effets relatifs de la corrosion sur l'acier doux (exprimés en centièmes de celui du fer forgé) oscillent entre les limites suivantes :

TABLEAU 13

OBSERVATEURS	PERTE DE POIDS PAR LA CORROSION de l'acier doux exprimé en centièmes de celui du fer forgé	COMPOSITION DU FER FORGÉ					
		C	Si	Mn	P	S	Oxyde
Andrews	102	»	»	»	»	»	»
Parker	101 à 141	0,09 à 0,14	0,02 à 0,12	0 à 0,03	0,10 à 0,32	0 à 0,03	»
Farquharson	107	»	»	»	»	»	»
Carnegie	83 à 110	»	»	»	»	»	»
Howe	92 à 117	»	0,13 à 0,24	0 à 0,10	0,13 à 0,33	0,016 à 0,040	1,20 à 2,72
Krupp	78 à 93	0,06 à 0,09	0,17 à 0,09	0,15	0,10 à 0,18	0,008 à 0,015	»
Gautier	43	»	»	»	»	»	»

L'hypothèse que, grâce à son homogénéité ou à l'absence des soufflures, les six aciers de Krupp se ressemblent l'un à l'autre, en possédant une résistance exceptionnelle à la corrosion (ou que ses six fers forgés se ressemblent l'un à l'autre, en possédant une résistance exceptionnellement faible) — cette hypothèse me paraît beaucoup plus vraisemblable que l'hypothèse alternative que ses trois conditions d'exposition se ressemblent l'une à l'autre, en étant plus favorable à l'acier qu'au fer forgé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En résumé de cette discussion des trois causes déjà énumérées des variations dans la corrosion relative de l'acier doux et du fer forgé, il résulte de l'évidence que c'est une « working hypothesis » vraisemblable que ces trois causes non seulement existent, mais qu'elles sont importantes. Naturellement, d'autres aussi peuvent exister.

§ 19. **Cas des chaudières marines.** — Si (cause 2) la différence intrinsèque entre les effets de la corrosion sur le fer et sur l'acier doux varie en signe comme nous l'avons supposé, nous n'aurions pas lieu d'être surpris si nous constations qu'elle varie aussi beaucoup en valeur absolue. La leçon fournie par nos expériences, à savoir que, dans l'eau de mer et dans l'eau de rivière froides, ainsi que dans l'air atmosphérique, il n'y a pas grande différence entre le fer forgé et l'acier doux au point de vue des effets de la corrosion, n'indique pas du tout qu'il n'y a pas non plus une grande différence entre eux dans d'autres conditions. En effet, le fait que dans les essais de Parker, le même acier doux, qui s'est corrodé environ autant que le fer forgé dans l'eau de mer et dans l'eau de cale froides, se corrode beaucoup plus rapidement dans l'eau de mer bouillante que le même fer forgé[1], ce fait, dis-je, est parfaitement en harmonie avec l'hypothèse que nous avons faite au sujet de la seconde cause de variation.

Depuis que ses expériences ont été publiées, il n'y a été ajouté que peu de chose au point de vue des résultats numériques, mais il est intéressant de noter : 1° que dans l'eau douce d'alimentation chaude les aciers de Krupp se corrodent à peu près 31 % plus vite que ses fers forgés, tandis que dans toutes autres conditions d'immersion ils se corrodent nettement plus lentement que les mêmes fers forgés; 2° que les reproches les plus sévères faits à l'acier doux au sujet de sa prétendue corrodabilité sont basés sur les résultats obtenus en service avec des tubes de chaudières marines.

Ainsi, en Grande-Bretagne, les tôles employées pour les chaudières de la marine de commerce sont presque toujours des tôles d'acier; les tirants sont habituellement en acier, tandis que les tubes sont presque toujours en fer forgé[2]. La raison de cette différence est peut-être : 1° que, pour être transformé en tubes, l'acier doit se souder très facilement et doit contenir par conséquent très peu de carbone; 2° que l'absence de carbone facilite la production de soufflures, d'où les piqûres dont on s'est plaint dans les tubes de chaudières en acier. Les corps de chaudières marines peuvent au contraire contenir plus de carbone : et de plus les tôles de ces corps sont beaucoup plus épaisses que leurs tubes, de sorte que une rapidité de corrosion, qui pourrait être fatale dans le cas des tubes, peut être tolérée dans le cas des tôles.

Bien que Parker ait trouvé que, dans l'eau de mer bouillante, l'acier se corrode décidément plus vite que le fer forgé, ce fait n'a pas beaucoup d'importance au point de vue des tôles des corps de chaudières, parce que beaucoup de chaudières marines ont d'ailleurs fourni plus de 20 ans de service.

Je tirerai provisoirement de ces faits les conclusions suivantes :

1° La légère infériorité de l'acier comparativement au fer forgé, au point de vue de la manière dont il se comporte dans l'eau de mer, s'accentue dans l'eau de mer bouillante. Mais cette infériorité, bien que notable, n'a pas grande importance ordinairement, comme les résultats avec les corps de chaudières marines le démontrent.

2° Les mauvais résultats signalés pour les tubes en acier des chaudières marines sont probablement dus à l'emploi simultané (A) d'une catégorie d'acier très corrodable, (B) d'une forme (tubes à parois minces) à laquelle la corrosion est spécialement nuisible, et (C) aussi à la réalisation d'une condition particulièrement défavorable à l'acier (eau bouillante).

§ 20. — Dans l'eau acidulée, dans la bière, le moût et l'infusion de houblon, qui sont probablement très fortement chargés d'acide carbonique, l'acier se corrode presque toujours plus lentement que le fer forgé dans les résultats du tableau 9, et, dans la plupart des cas,

1. Voir *Mineral Industry*, IV, p. 455, 1896.
2. Lloyd's Register of British and Foreign Shipping, renseignement particulier, July 31, 1900.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la différence est étonnamment grande. Dans un bain alcalin, au contraire, l'acier se corrode beaucoup plus vite que le fer forgé dans les cas dont nous venons de parler[1].

§ 21. Susceptibilité à la corrosion exceptionnellement rapide. — Il ne suffit pas de connaître l'effet moyen de la corrosion sur une matière de structure analogue à l'acier; on doit aussi savoir si des constructions importantes exécutées en acier sont exposées à des cas individuels et exceptionnels de corrosions locales rapides. Dans beaucoup de cas, c'est cette dernière considération qui est la plus importante. Par exemple il importe peu de savoir qu'un tuyau en acier enterré et inaccessible perdra moins de poids en moyenne sur toute sa longueur, par suite de la corrosion, qu'un tuyau en fer forgé. Par contre, il serait bien plus important de savoir que, bien que la plupart des éléments d'un tuyau puissent admirablement résister à la corrosion, quelques autres ou même une seule tôle pourra se corroder très rapidement, d'où une mise hors de service subite de ce tuyau, dont l'avarie paralysera une industrie ou l'alimentation en eau d'une grande ville.

Des recherches analogues à celles que j'ai faites peuvent difficilement permettre de répondre catégoriquement à cette question; elles ne permettent pas de traiter la question à fond, puisqu'elles ne nous fournissent aucun renseignement au sujet de l'importance des piqûres. Le tableau 7 montre que, d'après mes essais, pour aucune des conditions d'exposition, le maximum de corrosion du fer forgé ou de l'acier ne diffère grandement de celui de l'autre métal. La même constatation ressort des essais de Krupp, en ce qui concerne l'immersion dans l'eau douce d'alimentation, l'exposition à l'air atmosphérique ou à l'air chaud humide, bien qu'une de ses tôles d'acier doux ait perdu dans l'eau de mer 44 % de plus qu'aucune de ses tôles de fer forgé. Si l'on considère les résultats des essais de Parker, on voit que, dans l'eau de mer comme dans l'eau de cale froides, une de ses plaques de fer forgé s'est corrodée plus rapidement qu'aucune de ses tôles d'acier, bien que, dans l'atmosphère de Londres et dans le cas des chaudières marines, son acier se soit corrodé plus rapidement que son fer forgé. Cependant, dans le cas de l'acier, les variations ne paraissent pas en général plus grandes que celles qui se produisent dans le cas du fer forgé.

Autant qu'on peut l'affirmer, les résultats acquis actuellement n'indiquent pas que l'un des deux métaux soit nettement plus susceptible que l'autre à une corrosion exceptionnellement rapide.

L'emploi continuel de grandes quantités de tuyaux d'acier doux pour les conduites d'alimentation des grandes villes en eau potable est en accord avec ces conclusions. Dans ce cas une corrosion exceptionnellement rapide aurait une importance assez considérable pour forcer l'attention des ingénieurs, ce qui n'a pas eu lieu certainement jusqu'à présent.

§ 22. Explication de la différence de corrodabilité supposée entre le fer forgé et l'acier doux. — J'ai suggéré comme l'une des causes de divergences dans les effets relatifs de la corrosion sur ces deux catégories de métaux une différence intrinsèque dans leur aptitude à la corrodabilité, différence qui varie non seulement en valeur absolue, mais encore change de signe suivant les conditions d'exposition. Comment peut-on expliquer l'existence d'une telle divergence? Quelles sont les différences de composition ou de constitution entre le fer forgé et l'acier doux qui peuvent permettre d'atteindre une différence variante en cette façon?

En dehors de ce fait que le fer forgé contient ordinairement moins de manganèse et plus de phosphore que l'acier doux, on constate entre les deux métaux deux différences importantes. Le fer forgé contient une proportion considérable de scories en lamelle ou en feuillets mécaniquement interposés dans le fer pur ou « ferrite »; l'acier doux, qui ne présente pas ce défaut, contient ordinairement beaucoup plus de carbone que le fer forgé. Ce carbone existe sous la forme de carbure défini Fe^3C ou cémentite, dont l'acier contient 15 parties pour chaque partie de carbone; ainsi à une teneur de 0.10 % de carbone cor-

1. Voir *Mineral Industry*, IV, p. 442, où l'on trouvera d'autres raisons qui mènent à conclure que l'acier se comporte particulièrement mieux que le fer forgé dans l'eau acidulée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

respond une teneur de 1.5 % en cémentite. La cémentite, qui se présente en lamelles microscopiques, existe dans le fer forgé et dans l'acier doux, mais en plus forte proportion dans ce dernier métal, et cet excès de cémentite dans l'acier est du même ordre d'importance que l'excès de lamelles de scories dans le fer forgé. Chacune de ces matières, scories ou cémentite, doit avoir une double influence : 1° comme elles résistent toutes deux énergiquement à l'oxydation, elles protégeraient comme une couche de peinture les particules de fer pur ou ferrite qu'elles recouvrent; 2° chacun de ces corps, grâce à sa différence de potentiel, hâterait ou retarderait la corrosion du fer, suivant les cas. Reconnaissons distinctement cette double influence de chacune de ces deux substances, scories pour le fer forgé et cémentite pour l'acier doux; chacune exerce en même temps une action protectrice mécanique, et aussi, grâce à une différence de potentiel, hâtant ou retardant la corrosion du fer métallique qu'elle recouvre[1]. On peut s'attendre à ce que, non seulement l'intensité, mais même le signe de chacune de ces différences de potentiel change avec le fluide ambiant, et à ce que, par conséquent, la résultante de la protection mécanique et de la différence de potentiel varie largement. C'est à cette variation de la résultante que j'attribue la variation intrinsèque que j'ai supposée pour la corrodabilité relative du fer forgé et de l'acier doux considérés chacun en bloc. En particulier, j'appellerai l'attention sur ce fait que les résultats portés au tableau 9 tendent à montrer que l'acier doux se corrode nettement moins que le fer forgé dans les bains acidulés, mais beaucoup plus que le même métal dans les bains alcalins; cette différence est en harmonie parfaite avec mes hypothèses. Ce contraste entre les liquides acides et alcalins se base sur les expériences limitées de Williams, et des recherches ultérieures peuvent montrer qu'il est purement accidentel; mais au moins il est frappant.

L'influence de la cémentite sur la rapidité de la corrosion causée par la différence de potentiel peut fournir l'explication de ce phénomène, surprenant sans cette explication, que l'acier riche en carbone, et la fonte privée de sa couverture de surface, ne montrent pas la grande résistance à la corrosion que nous pourrions en attendre, étant donné la présence d'une forte proportion de cémentite difficile à oxyder. Ainsi, si l'on compare dans le tableau 9 les manières dont se sont comportés, d'une part les aciers durs et demi durs, d'autre part les aciers pauvres en carbone, dans les expériences auxquelles tous deux ont été soumis, on trouve qu'en réalité les derniers se sont corrodés moins que les premiers. On trouve ce résultat dans les expériences d'Andrews et d'Adamson, et dans quatre groupes d'essais de Krupp sur six.

De même, dans une discussion antérieure[2] à laquelle je n'ai d'ailleurs rien à ajouter, je concluais, d'après les résultats des essais publiés, que la fonte privée de sa croûte superficielle ne résistait pas mieux que l'acier à la corrosion. J'ai fait de longues recherches sur la différence de potentiel entre le fer pur d'une part, la scorie de fer forgé et la cémentite de l'acier d'autre part; malheureusement je ne puis en donner les résultats dans cette note.

§ 23. Influence de la durée de l'exposition. — Des deux influences analysées plus haut, influence du potentiel et influence de la protection mécanique, la dernière devra devenir

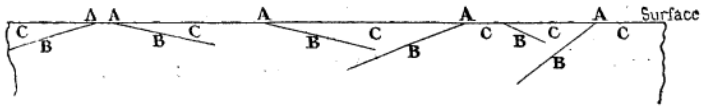


Fig. 5. — Figure montrant l'augmentation de la protection mécanique exercée par la scorie et la cémentite au fur et à mesure des progrès de la corrosion.

certainement plus forte lorsque la corrosion se développera; parce que, au début, comme le représente la figure 5, seulement les affleurements (A) des scories (ou de la cémentite)

1. Il est possible que cette manière de voir est nouvelle, sauf que j'en ai donné un aperçu dans *The Mineral Industry*, 1895, IV, p. 445.
2. Voir *The Metallurgy of Steel*, § 165, p. 98.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 14 [1]

Comparaison de la corrosion des deux périodes.

DÉSIGNATION DES MÉTAUX	PERTE DE POIDS PENDANT LA SECONDE PÉRIODE exprimée en centièmes de la perte de poids pendant la première période [1]		
	EAU DOUCE	AIR ATMOSPHÉRIQUE	MOYENNES
Fer forgé.	92	105	99
Acier doux.	89	98	94
Acier à 3.18 % de nickel.	92	126	109
Acier à 26.441 % de nickel.	137	123	130
Moyennes.	102	113	108

1. Non compris les tôles mises en connexion avec des tiges de zinc.

recouvrent et protègent la ferrite B située au-dessous, tandis que la ferrite superficielle C n'est pas protégée. La ferrite C est progressivement détruite par la corrosion, ce qui met à nu une surface de scorie (ou de cémentite) de plus en plus grande, qui peut alors s'opposer aux progrès ultérieurs de la corrosion et protéger la ferrite B.

Mais, tandis que la protection mécanique fournie par la scorie ou la cémentite augmente au fur et à mesure que la corrosion se développe, et doit tendre ainsi à en retarder les progrès, il n'est pas évident que l'effet produit par la différence de potentiel augmentera, ou tout au moins qu'il augmentera dans les mêmes proportions.

Examinons de nouveau nos résultats à ce point de vue, parce que, bien qu'à première vue, ils tendent à montrer que l'acier doux et le fer forgé se corrodent en général au même degré, cependant on croit généralement que l'acier doux se corrode beaucoup plus vite que le fer forgé. Nous pouvons soupçonner avec raison que nos résultats d'expériences sont infirmés en partie par ce fait, que l'on a fait entrer principalement en ligne de compte le début de la période de corrosion, pendant laquelle l'affleurement seul de la couche de scorie du fer forgé est effectif à protéger la ferrite de la corrosion : tandis que les résultats de l'emploi industriel, sur quoi est basé si faillibleMent cette opinion vulgaire et souvent intéressée défavorable à l'acier, représentent une corrosion plus avancée, poussée même jusqu'à la destruction. Dans cette longue période de corrosion, le fer forgé peut être favorisé dans une large mesure par une augmentation progressive de la protection mécanique due à ses scories.

Heureusement, les résultats dont nous disposons tendent fortement à éloigner ce soupçon, car, dans trois cas sur quatre dans lesquels nous avons obtenu des résultats comparables, une comparaison entre la corrosion de l'acier et celle du fer forgé résulte plus favorablement à l'acier dans une grande prolongation de l'exposition que dans la première partie de cette même exposition, comme le montre le tableau suivant :

1. Exemple. — Nous expliquerons par un exemple la signification de ce tableau. La perte de poids moyenne des tôles de fer forgé dans l'eau douce était pendant la première période de 315 jours à raison de 6gr,5 par décimètre carré par année. Pendant la seconde période de 337 jours la perte de poids était à raison de 6 grammes par décimètre carré par année. La perte de poids pendant la seconde période exprimée en centièmes de la perte de poids pendant la première période est donc de

$$\frac{6 \times 100}{6,5} = 92\ \%;$$

c'est ce chiffre qui figure dans la colonne 2 (ligne 1) du tableau 14.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 15

Influence de la durée de l'exposition sur la perte de poids de l'acier doux exprimée en centièmes de celle du fer forgé.

		AIR CHAUD HUMIDE	AIR ATMOSPHÉRIQUE			EAU DOUCE	AIR ATMOSPHÉRIQUE
Krupp	3 ans 1/2. . . .	86.5 %	78.2 %	Howe	Première année. .	95 %	107 %
	10 ans	80.7 %	93.3 %		Deuxième — . .	92 %	100 %

§ 24. Acier au nickel. — Dans mes expériences, ainsi qu'il fallait s'y attendre, les aciers au nickel à 3 et à 26 % de nickel se corrodent moins, dans toutes les conditions, que le fer forgé ou l'acier. La différence cependant était moindre que l'on aurait pu s'y attendre. En prenant la moyenne générale, on a trouvé que l'acier à 3 % de nickel se corrodait 75 % et l'acier à 26 % de nickel environ un tiers aussi vite que l'acier doux.

Les résultats de Carnegie ne diffèrent pas sensiblement des miens : parce que dans les conditions semblables aux miennes, c'est-à-dire que dans l'eau de mer froide et dans une dissolution froide de chlorure de sodium, son acier à 3 % de nickel ne montre pas une supériorité marquée sur l'acier doux; mais, dans l'eau douce, il se corrode réellement plus vite que ce dernier métal. On doit remarquer, cependant, que dans d'autres conditions : vapeur, eau salée bouillante, eau acidulée (un cas seulement) ou alcaline, bière, moût et dans l'infusion de houblon, son acier au nickel se corrode beaucoup moins que son acier doux.

La supériorité à cet égard de l'acier à 3 % de nickel est si faible comparée avec ses supériorités à d'autres points de vue, qu'elle n'influence pas sérieusement la question de son adoption dans l'industrie; sauf peut-être, si les résultats des expériences de Carnegie à ce point de vue sont confirmées, son adoption pour résister aux liqueurs acidulées.

La supériorité de l'acier à 26 % de nickel est très grande, et, combinée avec les qualités remarquables de résistance à la traction et de ductilité de ce métal, elle doit amener graduellement les constructeurs à l'employer dans des cas où il est nécessaire de réunir ces trois qualités.

Nous ne devons pas supposer, cependant, que l'acier à 26 % de nickel résiste aussi bien à la corrosion que les alliages de cuivre avec lesquels il est en concurrence. Ce n'est pas un métal non corrodable, mais seulement un métal lentement corrodable, plus fort que les alliages de cuivre.

§ 25. Comparaison de la corrodabilité dans les divers milieux considérés. — Comme on peut s'y attendre, la corrosion dans l'eau douce est beaucoup plus rapide (en réalité environ trois fois plus rapide) que dans l'air atmosphérique. Elle est beaucoup plus rapide dans l'eau de mer (caisse I) que dans l'eau douce, et la différence, qui est de 65 %, n'est pas loin de celle à laquelle on pouvait s'attendre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU 16

Actions corrosives comparées de l'eau de mer, de l'eau douce et de l'air atmosphérique.

(Non compris les tôles mises en connexion avec des tiges de zinc.)

DÉSIGNATION DES MÉTAUX	EAU DE MER		EAU DOUCE	AIR ATMOSPHÉRIQUE
	Caisse I [1]	Caisse II		
Fer forgé	448	192	290	100
Acier doux	520	217	264	100
Acier à 3.18 % de nickel	574	220	347	100
Acier à 26.441 % de nickel	440	241	303	100
Moyenne générale	495	218	301	100

1. Les résultats de la caisse I seulement sont comparables avec ceux que l'on a obtenus dans l'eau douce et dans l'air atmosphérique.

§ 26. Couple galvanique avec le zinc métallique. — Nous doutons, naturellement, si l'influence d'une connexion avec du zinc métallique peut s'étendre assez loin du point où cette connexion est établie pour que cette influence soit importante. Les résultats résumés dans le tableau n° 17 supportent ce doute. En concentrant pour l'instant notre attention sur la première période, et en éliminant le cas de l'acier à 26 % de nickel exposé à l'action de l'air atmosphérique, on trouve non seulement que les tôles mises en connexion avec du zinc métallique perdent dans chaque cas moins que les autres tôles ne perdent en moyenne, mais que 72 tôles non mises en connexion avec du zinc métallique, sur 83, ont subi une corrosion plus forte que les tôles connectées avec du zinc. Et même, dans trois séries d'essais, chacune des 11 tôles non connectées avec du zinc, et dans un quatrième groupe, 10 sur 11, se sont plus corrodées que les plaques connectées.

TABLEAU 17 [1]

Influence du zinc au point de vue de la protection contre la corrosion des tôles de fer et d'acier soumises aux essais, au moyen d'une connexion électrique.

DÉSIGNATION DES MÉTAUX	PERTE DE POIDS DES TOLES CONNECTÉES AVEC ZINC exprimée en centièmes de la perte de poids éprouvée par des tôles semblables non connectées					
	EAU DOUCE			AIR ATMOSPHÉRIQUE		
	1re période	2e période	Durée entière	1re période	2e période	Durée entière
Fer forgé	87	102	94	95	111	103
Acier doux	95	110	102	87	118	103
Acier à 3.18 % de nickel	91	95	94	87	111	101
Acier à 26.441 de nickel	93	92	93	183	79	124

1. Exemple. — La perte de poids moyenne annuelle subie dans l'eau douce par les tôles de fer forgé, non connectées avec le zinc, était de 6gr,5 par décimètre carré. La perte de poids de la tôle correspondante connectée avec le zinc (n° 55-2 du tableau 3) était de 5gr,7. La perte de poids des tôles de zinc connectées exprimée en centièmes de la perte des plaques non connectées était de

$$\frac{5{,}7 \times 100}{6{,}5} = 87\ \%,$$

comme on le voit dans le tableau 17.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cependant, bien que l'action du zinc est évidente dans un grand nombre de cas, elle est peu énergique, car, dans aucun groupe d'essais, la moyenne des différences entre les tôles connectées et non connectées ne dépasse 13 %.

Cette différence, même si elle était également répartie sur toute la surface, au lieu d'être sans doute localisée au voisinage du point de connexion avec le zinc, n'aurait que difficilement une importance commerciale dont on puisse tenir compte.

En examinant la question de plus près, on constate des résultats surprenants. Avant que les tôles fussent exposées pour la première fois, les connexions avec les tiges de zinc furent soigneusement soudées : les soudures furent brisées dans les joints après la première période d'exposition, pour nous permettre de peser les tôles. Pour la seconde exposition, le joint fut réalisé au moyen d'une simple vis reliant les tôles aux tiges de zinc, sans soudure : or, on a constaté que, dans cinq groupes de cas sur sept, les résultats de la seconde période ont été exactement l'inverse de ceux de la première. Cette fois-ci les tôles connectées avec des tiges de zinc se sont corrodées plus que les autres, non seulement en moyenne, mais pour 49 échantillons sur 55.

Les résultats obtenus avec l'acier à 26% de nickel exposé à l'action de l'air atmosphérique sont encore plus frappants. Pendant la première période d'exposition, les tôles connectées avec des tiges de zinc se sont corrodées plus rapidement qu'aucune des 23 tôles non connectées, et beaucoup plus rapidement que n'importe laquelle, sauf une seule; les résultats obtenus au bout de la première année d'exposition sont exactement l'inverse de ceux de la seconde, pendant laquelle 21 tôles non connectées, sur 23, se sont plus corrodées que les tôles connectées. Nous avons donc ce fait frappant que l'effet que la connexion avec le zinc produit pendant la première année, soit en hâtant, soit en retardant la corrosion, est exactement l'inverse pendant l'année suivante, probablement quand cette connexion est devenue inefficace. Le nombre de cas qui ont donné lieu à cette constatation est si grand (voir tableau 18), que nous hésitons à attribuer le phénomène au simple hasard, bien que, dans chaque groupe, nous n'ayons qu'une seule tôle connectée à comparer avec les tôles non connectées.

TABLEAU 18

Inversion des effets produits par la connexion des tôles avec des tiges de zinc.

DÉSIGNATION DES MÉTAUX	TOLES NON CONNECTÉES s'étant corrodées : 1° Plus rapidement; 2° Plus lentement que les tôles connectées	EAU DE RIVIÈRE NOMBRES		AIR ATMOSPHÉRIQUE NOMBRES	
		1re année	2e année	1re année	2e année
Fer forgé	Plus rapidement	11	3	7	1
	Plus lentement	0	8	4	10
Acier doux	Plus rapidement	8	0	11	0
	Plus lentement	3	11	0	11
Acier à 3.18 % de nickel	Plus rapidement	11	11	10	2
	Plus lentement	0	0	1	9
Acier à 26 % de nickel	Plus rapidement	14	12[1]	0	21[2]
	Plus lentement	3	3	23	1

1. Non compris deux des tôles non connectées corrodées au même degré qu'une tôle connectée.
2. Non compris une des tôles non connectées corrodées au même degré qu'une tôle de zinc connectée.

La cause de ces inversions est difficile à comprendre, surtout étant donné que chaque tôle avait été soigneusement nettoyée entre la première et la seconde exposition. Le fait que cette inversion n'a pas lieu dans le cas des aciers à 3.18 % ou à 26 % de nickel

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

immergés dans l'eau de rivière peut s'expliquer en supposant que, malgré l'absence de soudure, il existait une connexion galvanique effective.

§ 27. Conclusions. — Les principaux résultats que j'ai obtenus peuvent être résumés comme suit :

Après avoir fait la part : 1° des différences considérables qui existent entre les diverses catégories de fers forgés et entre les diverses qualités d'aciers doux; 2° des effets considérables produits par les variations quasi accidentelles, il reste probablement entre l'acier doux et le fer forgé une différence intrinsèque dans la corrodabilité, différence qui varie beaucoup elle-même en grandeur absolue, et même en signe, suivant les conditions ambiantes.

Ainsi, l'acier doux paraît jouir d'une supériorité énorme sur le fer forgé dans le cas de l'eau acidulée, et d'une légère supériorité sur le fer forgé dans le cas de l'eau douce; le fer forgé est, au contraire, un peu supérieur à l'acier dans le cas de l'eau de mer non confinée et très supérieur à l'acier dans le cas de l'eau de mer bouillante, comme l'ont indiqué des expériences comparatives directes et l'expérience commerciale. Mais cette dernière supériorité est d'un ordre inférieur aux autres avantages de l'acier au point de vue de tels emplois que la construction des corps de chaudières marines qui, probablement à cause de leur forte épaisseur initiale, ont une durée très longue malgré la corrosion. Cependant cette infériorité de l'acier doux peut avoir une influence fatale quand il se produit un concours de circonstances défavorables, comme dans le cas des tubes de chaudières marines, peut-être parce que le métal de ces tubes est d'une composition spéciale qui facilite la soudure, mais qui favorise la corrosion, dont les effets sont très nuisibles à cause de la faible épaisseur des tubes.

En effet, la corrodabilité relative de l'acier doux et du fer forgé change avec les conditions, de telle manière que, dans l'eau de mer bouillante, l'acier doux est le plus corrodable des deux, tandis que dans d'autres conditions (eau douce) le fer forgé est plus corrodable que l'acier doux.

Parmi les causes admissibles de la variable différence générique dans la corrodabilité du fer forgé et de l'acier doux figure, à mon avis, la résultante variable de l'action mécanique protectrice (1) et de l'influence de la différence de potentiel (2), de la scorie du fer forgé (A) et de la cémentite (B), dont l'acier doux contient une plus grande proportion que le fer forgé.

L'évidence présente n'indique pas que l'acier doux est plus sujet que le fer forgé à des cas individuels de corrosion exceptionnellement rapides, ni que la prolongation de la longueur des périodes d'exposition est plus défavorable à l'acier qu'au fer forgé.

L'acier à 3 % de nickel se corrode ordinairement considérablement moins, et l'acier à 26 % de nickel se corrode à peu près un tiers moins vite que l'acier doux. Cette supériorité de l'acier à 3 % de nickel est d'une importance secondaire; celle de l'acier à 26 % est très grande, surtout combinée avec ses autres propriétés remarquables.

La connexion électrique avec des tiges de zinc métallique retarde légèrement la corrosion, mais pas suffisamment pour qu'on attribue de l'importance à ce fait.

HOWE.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

XIII

LES

ENTRETOISES DE FOYERS DE LOCOMOTIVES

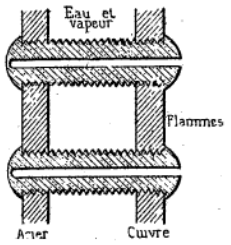
COMMUNICATION

Présentée par M. LE BLANT

INGÉNIEUR CIVIL DES MINES, CHEF DU SERVICE DES RÉCEPTIONS DU MATÉRIEL ET DE LA TRACTION DES CHEMINS DE FER DE L'EST

Les parois des foyers de locomotives présentent de grandes surfaces planes, qui ne pourraient supporter les pressions s'élevant jusqu'à 16 kilogrammes par centimètre carré, si elles n'étaient pas solidement armaturées.

Ces faces étant généralement parallèles, sont reliées par des pièces filetées, vissées dans les deux parois voisines, puis rivées, que l'on appelle *entretoises*, et qui ont donc pour but, *a priori*, de résister à un effort de traction.



Le nombre des ruptures d'entretoises, au commencement de la mise en service de locomotives à grands foyers, a conduit les différents services du matériel et de la traction de la Compagnie de l'Est à faire l'étude : 1° des efforts auxquels sont soumises les entretoises; 2° des résultats donnés par la pratique.

La présente note a pour but de résumer ces travaux. Elle est divisée en six parties :

PREMIÈRE PARTIE. — *Cuivre rouge.*
DEUXIÈME — *Métaux autres que le cuivre rouge.*
TROISIÈME — *Comparaison des différents métaux.*
QUATRIÈME — *Résultats en service.*
CINQUIÈME — *Conclusions finales.*
SIXIÈME — *Appendice* donnant des détails sur les appareils d'essais et sur les opérations.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PREMIÈRE PARTIE

CUIVRE ROUGE

I. — ÉTATS CHIMIQUES ET PHYSIQUES. — CAHIER DES CHARGES.

Les cuivres satisfaisaient aux conditions du cahier des charges suivantes :

1° **Essais de traction à froid**[1]. — Résistance minima : 22 kilogrammes; moyenne minima : 24 kilogrammes (par millimètre carré de section primitive S).

Allongement minimum : 24 %; moyen minimum : 26 (sur une longueur entre repères : $L^{mm} = \sqrt{100\,S^{mm^2}}$).

2° **Essais de filetage.** — Filet obtenu en deux passes : première passe : chariotage; deuxième passe : mise au profil sans arrachement.

3° **Essai de pliage effectué après filetage.** — A bloc sans criques.

4° **Essai de poinçonnage.** — Enfoncement d'un poinçon conique, pour s'assurer que la barre n'est pas fendue longitudinalement.

5° **Essais chimiques.** — Maximum d'impuretés : 0,3 %.

II. — ANALYSES CHIMIQUES[2].

Les résultats relevés pendant deux ans ont donné les teneurs suivantes :

Arsenic	de 0,15 % à 0.
Phosphore	de traces indosables à 0.
Soufre	de traces indosables à 0.
Plomb	de 0,089 % à 0.
Fer	de traces indosables à 0.
Antimoine	de 0,045 % à 0.
Argent	de traces indosables à 0.
Cuivre	(par différence) de 99,8 % à 100.

Conclusion. — Les cuivres employés, provenant de sept usines, sont très voisins les uns des autres au point de vue des corps dosés; mais l'oxydule, auquel on peut attacher une grande importance, n'a pas été recherché.

III. — ÉCROUISSAGE DE FABRICATION.

La fin de la fabrication des barres d'entretoises comporte une série de passages successifs en filière. Les barres sont recuites vers 700° au bout de trois ou quatre passes. Le serrage sur le diamètre à chaque passe est généralement inférieur à $0^m,001$.

Mais les barres sont livrées non recuites et ayant subi un dernier écrouissage dont l'importance varie entre $0^{mm},5$ et 3 millimètres de serrage sur le diamètre. Cet écrouissage a

1. Les conditions de traction ont été remplacées depuis par les suivantes, qui sont en vigueur actuellement

21 kg 5 $\leqslant$ R $\leqslant$ 24 kg 5.	Moyenne minima : 22 kg 5.
A % minimum 30.	Moyen minimum : 32 (sur $\sqrt{66.67\,S}$).

2. Toutes les analyses mentionnées dans la présente Note ont été faites sous la direction de M. Giraud, chef du laboratoire du matériel et de la traction de la Compagnie de l'Est.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour but de durcir légèrement le cuivre et d'en augmenter notablement la limite des allongements proportionnels, qui est quintuplée au moins. Dans ces conditions, le cuivre peut résister sans déformation permanente à la tension qu'il éprouve du fait de la pression dans la chaudière et il est facilement percé et fileté au moyen d'outils simples. Ces dernières opérations sont difficilement réalisables avec un cuivre peu écroui et chimiquement pur.

IV. — PERÇAGE ET FILETAGE.

En dehors du découpage à longueur, du dressage des bouts ainsi obtenus et de la formation d'une tête carrée pour permettre le vissage, le travail comprend trois opérations importantes : le perçage, le filetage et la pose.

Le perçage se fait, à la Compagnie de l'Est, au moyen d'un foret à langue d'aspic, mû par une perceuse au pied. Il a lieu sur toute la longueur de l'entretoise et a 6 millimètres de diamètre.

Le filetage est obtenu au moyen d'une machine à tarauder verticale. La filière est fixe, le cuivre tourne et descend à mesure de la formation des filets. Le filet a les formes représentées par les figures 1 et 2.

Fig 1
Ancien filet Est

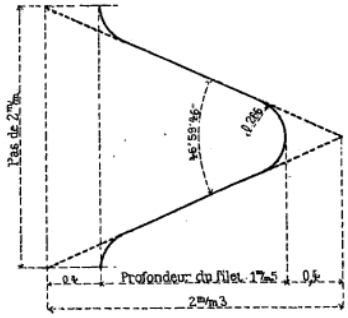
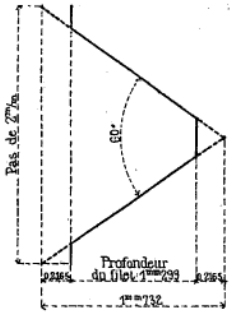


Fig 2.
Nouveau filet (pas français)



Pour ces opérations, il faut un cuivre ni trop mou, ni trop dur, car autrement les copeaux bourrent et cassent les forets et les peignes ou forment des filets avec arrachements.

V. — POSE.

Le cuivre subit un travail violent au marteau dans les dernières opérations de la pose, qui comprend le vissage, la formation des gouttes de suif, le matage.

Comme le marteleur frappe dans l'axe de la barre, il tend à déterminer dans le métal deux écoulements, l'un utile, parallèle au plan de la tôle, l'autre nuisible, parallèle à l'axe de l'entretoise. Ce dernier écoulement est atténué par la résistance des filets et par un turc.

Pour ce travail, on a besoin d'un métal mou, par conséquent pur et peu écroui. Ces conditions sont contradictoires avec les précédentes.

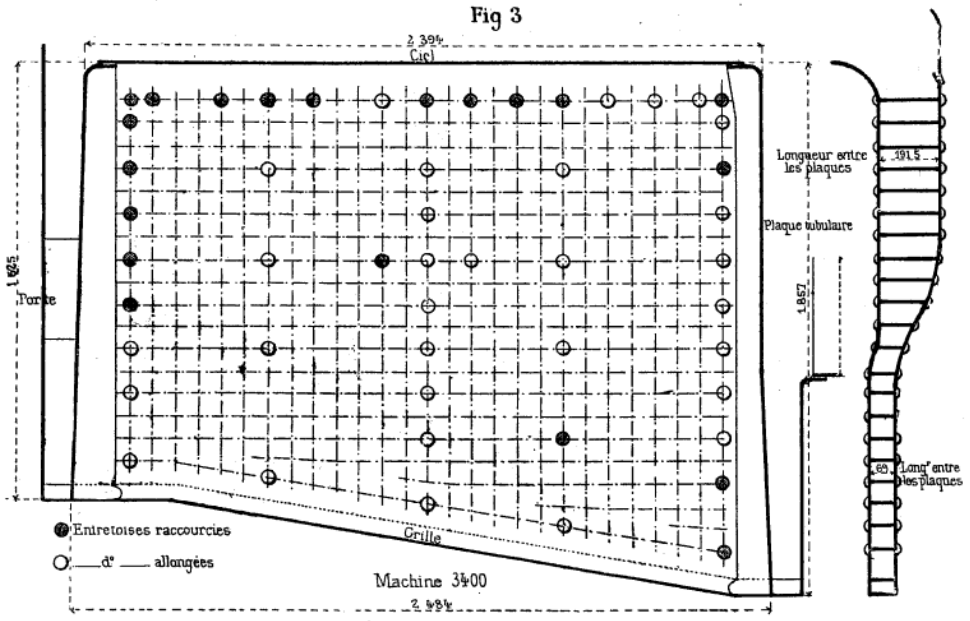
Pour se rendre compte des déformations que pouvait faire subir la pose à une entretoise, les ateliers ont fait l'expérience suivante[1] :

On a mesuré exactement la distance qui séparait les deux tôles après le vissage et avant la formation des têtes, puis après formation des gouttes de suif. Les mesures ont eu lieu sur un des flancs du foyer, en choisissant les entretoises extrêmes par ligne et colonne et les entretoises centrales (fig. 3).

1. Cette expérience et les essais relatifs à la température en service et aux dilatations des foyers ont été effectués sous la direction de M. Desgeans, ingénieur des ateliers d'Épernay.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig 3



Sur 51 entretoises mesurées :

19 se sont raccourcies de 0 à $1^{mm},18$, moyenne $0^{mm},49$;
30 se sont allongées de 0 à $1^{mm},26$, moyenne $0^{mm},35$;
Enfin 2 entretoises ont donné des résultats anormaux, l'une se raccourcissant de $2^{mm},10$, l'autre s'allongeant de $3^{mm},94$.

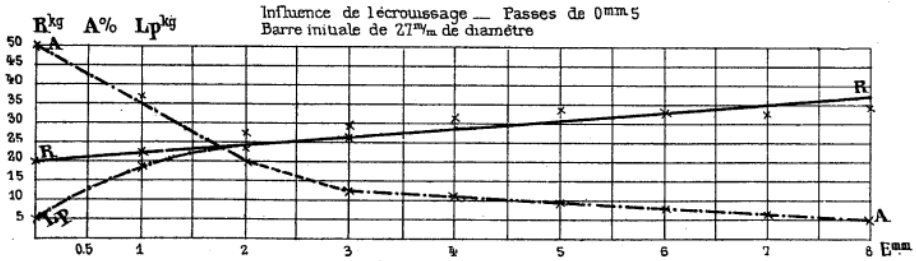
Conclusion. — Dans les opérations du rivetage, les entretoises prennent une série de déformations permanentes d'extension et de contraction (dont le résultat final a seul été mesuré), qui, toutes minimes qu'elles soient, peuvent être nuisibles à la conservation des pièces, si elles sont réparties sur un petit nombre de fonds de filet, comme on peut le supposer.

VI. — ÉTUDE DE L'ÉCROUISSAGE.

Cette étude a été faite par éprouvettes de traction et par éprouvettes de pliage filetées.

1° *Par éprouvettes de traction.* — Les résultats obtenus sont représentés par le graphique 1.

Gr. 1



Ils ont montré :

Qu'il est indifférent, pratiquement, de procéder par passes de 1 millimètre de serrage ou par passes de $0^{mm},5$;

Qu'il existe une variation brusque dans la courbe de l'allongement entre 2 et 4 millimètres de serrage (ce qui justifie la précaution, que prennent les usines, de recuire avant cette limite d'écrouissage);

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

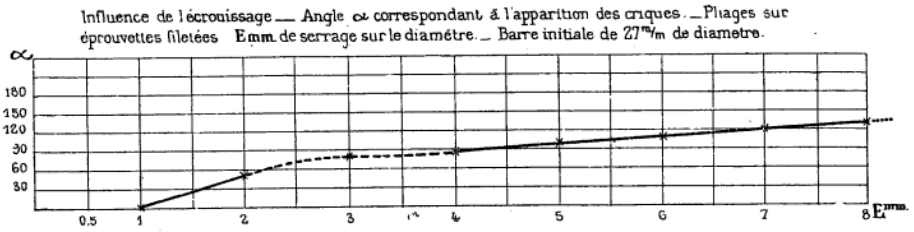
Que la limite des allongements proportionnels se confond pratiquement avec la résistance, dès que l'on donne un écrouissage supérieur à 2 millimètres de serrage sur le diamètre;

Enfin, qu'en appelant R_e la résistance d'un cuivre écroui, R_r la résistance du même cuivre recuit et E le serrage sur le diamètre en millimètres, on a en kilogrammes :

$$R_e = R_r + 1{,}9\ E \qquad \text{pour le cuivre essayé.}$$

2° *Par pliages sur éprouvettes filetées.* — Le graphique 2 donne les résultats.

Gr. 2.



Les angles d'apparition des criques montrent encore l'altération spéciale que subit le cuivre entre 2 et 4 millimètres d'écrouissage. Avec 0mm,5 d'écrouissage, l'éprouvette va encore à bloc; avec 1 millimètre, on n'obtient plus que les branches parallèles.

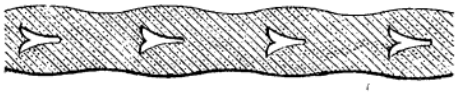
On s'est rendu compte de la profondeur à laquelle l'écrouissage pénètre par éprouvettes de traction. Les essais ont montré :

Que la résistance demeure constante pratiquement, quelle que soit l'épaisseur superficielle enlevée;

Que l'allongement augmente à mesure que l'on enlève les couches superficielles, sans toutefois arriver à atteindre l'allongement du cuivre recuit;

Enfin, un écrouissage poussé très loin a montré que le cuivre avait tendance à se désagréger intérieurement, comme le montre la figure 4. Mais l'étirage avait eu lieu dans une filière usée et on n'a pu reproduire le même effet avec une neuve. Le fait n'est donc intéressant que parce qu'il montre l'influence de la brutalité de l'écoulement superficiel sur la structure interne de la barre.

Fig 4



Conclusion. — Un cuivre donnant 25 kilogrammes de « R » paraît être le maximum de ce qu'on puisse demander.

VII. — ÉTUDE DE LA TEMPÉRATURE EN SERVICE.

Pour se rendre compte de la température des entretoises en service, on a placé à l'affleurement de la goutte de suif formée par l'entretoise sur la plaque en cuivre du foyer et dans le trou de l'entretoise, des baguettes en métaux fusibles à différentes températures.

On a relevé les longueurs fondues au bout d'un certain nombre de milliers de kilomètres et on a trouvé :

1° Que même pour l'étain (fusion à 226°), la partie fondue ne dépasse pas l'épaisseur de la paroi en cuivre du foyer, dont la température est certainement plus élevée que celle des entretoises baignant dans l'eau et la vapeur;

2° Que la partie extrême de la goutte de suif formant saillie dans l'intérieur du foyer peut être portée à une température voisine de 500° (fusion du Sb);

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° Que la partie entretoisée du foyer la plus chaude se trouve située au-dessous de la voûte en briques;

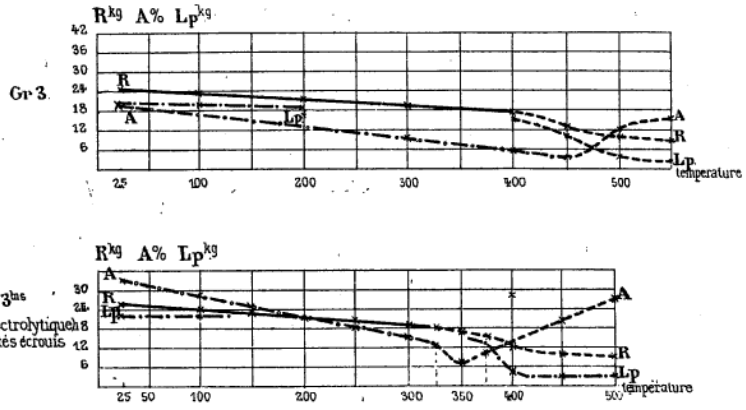
4° Que la température de l'entretoise à l'endroit où se produisent les ruptures le plus habituellement (voisinage de la tôle d'acier enveloppe de foyer) reste en dessous de 226°, point de fusion de l'étain.

Conclusion. — On ne doit pas attribuer à une diminution de résistance due à un excès de température les ruptures au point le moins chaud qui se produisent en service.

VIII. — ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES DE TRACTION.

Résistance R.
Limite des allongements proportionnels Lp } des entretoises (percées et filetées) à différentes
Allongement p. 100 : A sur $\sqrt{66{,}67\,S}$ } températures.

Le graphique 3 donne les résultats obtenus sur 6 provenances, les différences d'une usine à l'autre n'ayant que peu d'importance. Cependant le cuivre électrolytique subit plus rapidement les effets de la température, surtout pour l'allongement et la Lp (graphique 3^{bis}). Les entretoises filetées sur tube ont donné plus de régularité aux essais que les entretoises percées.



Les résultats sont les suivants :

1° Entre 150 et 400°, la Lp se confond pratiquement avec la résistance.

2° La variation brusque d'allure des courbes vers 400° doit être attribuée à la disparition de l'écrouissage, comme le montre l'abaissement subit de la valeur de Lp et le relèvement de l'allongement.

3° La résistance peut être indiquée (à 1 kilogramme près) par la formule :

$$R_t = R_{25} - 0{,}025\,t \qquad \text{pour} \qquad 25 < t < 400.$$

Cette formule ne s'applique au cuivre électrolytique que jusqu'à 350°.

4° Les minima trouvés à 200° sont :

$$R = 19\ \text{kg.} \qquad Lp = 17\ \text{kg.} \qquad A = 8{,}6\ \%$$

Le cuivre recuit donnerait à la même température et dans le même état (percé, fileté) :

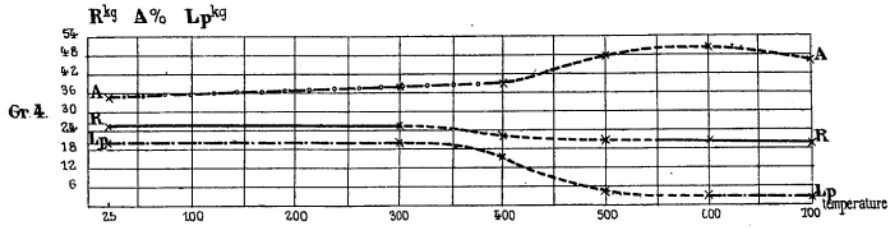
$$R = 17\ \text{kg.} \qquad Lp = 2\ \text{kg. } 4 \qquad A = 42\ \%$$

Conclusion. — La température à laquelle les courbes changent d'allure n'est pas atteinte dans les foyers.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

IX. — INFLUENCE DU RECUIT.

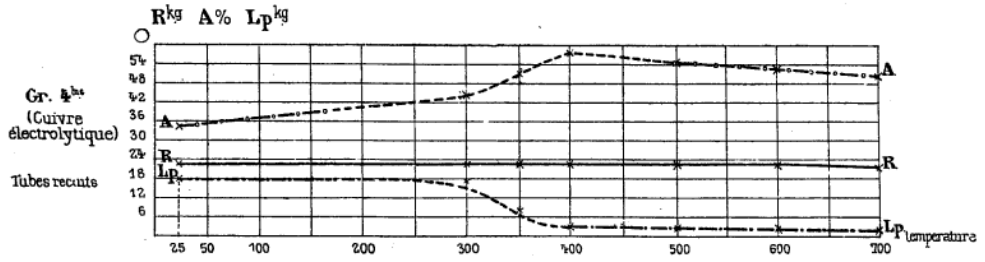
L'étude a eu lieu sur éprouvettes de traction à froid, préalablement recuites aux températures indiquées par le graphique 4.



Les résultats montrent :

1° Que la température du recuit préalable est sans influence sur les caractéristiques R et L*p*, tant qu'elle n'atteint pas 300°;

2° Qu'au delà de 300° les L*p* diminuent rapidement, pour rester stationnaires à partir d'une température comprise entre 500 et 600°; elles ont alors la valeur constante correspondant au cuivre recuit, qui est obtenue vers 400° pour le cuivre électrolytique (graphique 4^{bis});



3° Que les R diminuent lentement pour atteindre entre 500° et 600° la valeur de R du cuivre recuit;

4° Que les A augmentent lentement dès qu'il y a eu chauffage et varient rapidement entre 400° et 600°, pour atteindre à cette dernière température la valeur de A du cuivre recuit; à 700°, il y a une diminution d'allongement indiquant probablement un chauffage trop énergique. Le cuivre électrolytique subit la variation brusque d'allongement avant 300°.

Conclusion. — La température des entretoises en service n'est pas suffisante pour modifier l'écrouissage reçu en fabrication.

X. — CISAILLEMENT DES ENTRETOISES EN SERVICE.

Des expériences publiées par la Compagnie de l'Ouest, dans la *Revue Générale des Chemins de fer*, en octobre 1893, avaient montré que le foyer a un déplacement relatif par rapport aux tôles de l'enveloppe, pendant les périodes de chauffage et de refroidissement.

Ces études ont été reprises aux ateliers de la Compagnie de l'Est et ont porté sur deux types de foyer; l'un, dont le ciel est armaturé par des fermes transversales reposant sur des corbeaux fixés aux flancs de l'enveloppe de boîte à feu (fig. 5); l'autre, dont le ciel est relié au sommet de la boîte à feu par des tirants rigides verticaux, sauf les deux premières rangées de tirants, qui sont à dilatation, pour faciliter la montée de la plaque tubulaire (fig. 6).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig.5

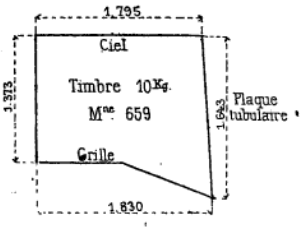
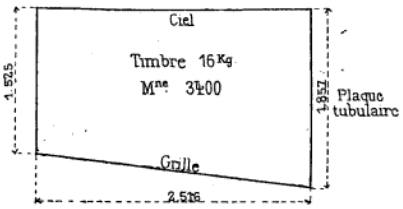
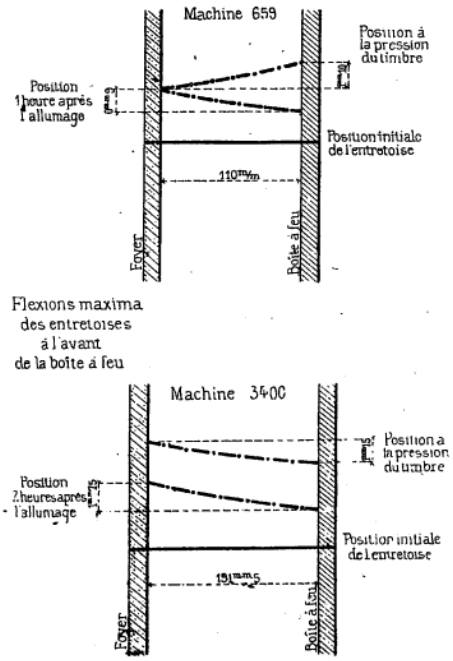


Fig.6



Les expériences ont montré :

1° Qu'au moment de l'allumage, le foyer monte plus rapidement que la boîte à feu, ce qui a pour effet de faire fléchir les entretoises autour de leur encastrement dans la boîte à feu, quel que soit le type de chaudière. Le maximum de flexion relevé a été de $0^{mm},9$ dans la chaudière à fermes et de $1^{mm},75$ dans la chaudière à tirants. A ce moment, la pression n'atteint 1 kilogramme dans aucune des chaudières;



2° Que, dès que la pression s'établit dans la chaudière, la différence de hauteur du foyer et de l'enveloppe diminue. Elle arrive même à changer de sens[1] dans le foyer à fermes et à donner, sous la pression du timbre, une flexion par rapport au point d'encastrement dans le foyer, cette fois, de $1^{mm},1$. Dans le foyer à tirants, la flexion a toujours lieu à l'encastrement dans la boîte à feu et n'atteint plus que $1^{mm},15$ maximum au timbre. Au refroidissement, on a trouvé les mêmes positions relatives;

3° Que les différences de mouvements relatifs trouvés dans les deux types de foyer sont attribuables aux dimensions plus grandes du foyer à tirants, ainsi qu'à la température plus élevée provenant du timbre.

Conclusion. — Il existe un mouvement relatif des foyers par rapport aux enveloppes, qui tend à cisailler les entretoises aux encastrements dans les tôles.

L'amplitude maximum des flexions constatée a été de $1^{mm},75$.

1. Ce fait doit être attribuable à un affaissement du ciel et prouverait alors que l'armaturage par fermes est inférieur à l'armaturage par tirants, au point de vue de la conservation du ciel du foyer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

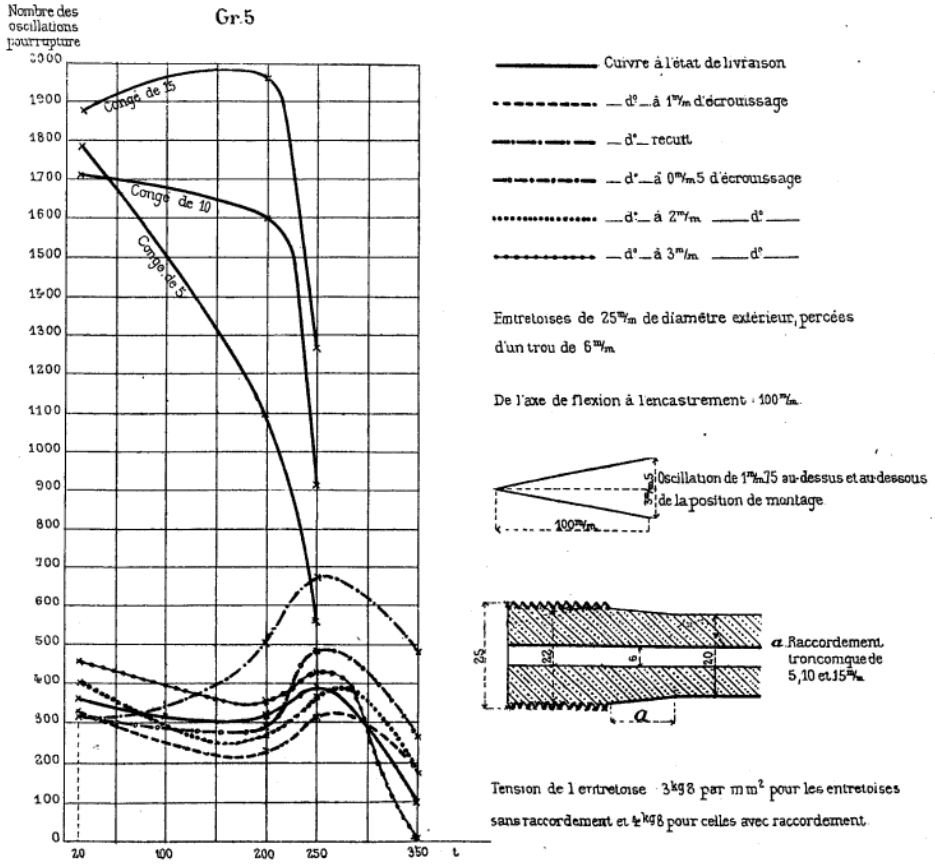
XI. — ESSAIS DE CISAILLEMENT SOUS TENSION.

Nous avons essayé les entretoises en encastrant une extrémité et en donnant à l'autre un mouvement alternatif. La barrette était maintenue ou non sous tension pendant l'essai.

Les essais ont eu lieu à des températures comprises entre 25° et 350°, sur du cuivre à différents degrés d'écrouissage.

Le graphique 5 donne les résultats des essais sur entretoises de 25 millimètres de diamètre extérieur, percées d'un trou de 6 millimètres et filetées au pas français.

Gr. 5



Ils montrent :

1° Que les raccordements tronconiques augmentent notablement le nombre des oscillations avant rupture;

2° Que le nombre d'oscillations ne paraît pas diminuer régulièrement avec la température, comme les essais de traction à chaud auraient pu le faire supposer;

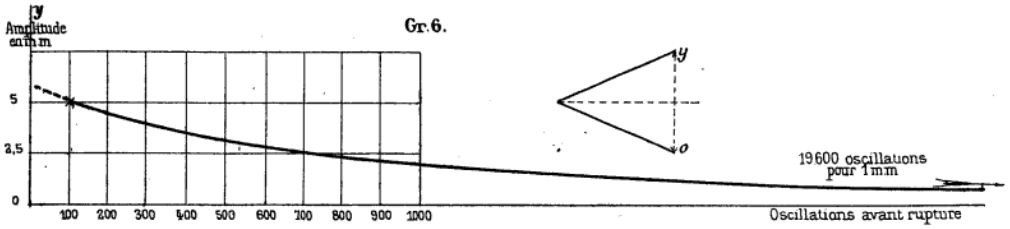
3° Qu'à 200°, l'entretoise donnant les meilleurs résultats est une entretoise à raccordement de 15 millimètres, toutes choses égales d'ailleurs;

4° Que, si on pouvait employer du cuivre recuit, il donnerait à cet essai de meilleurs résultats, soit comme nombre d'oscillations, soit comme sensibilité moindre à la chaleur; mais il s'allonge d'environ 4 pour 100 sous la tension de 3kg,8 par millimètre carré (correspondant à 15 kilogrammes de timbre). Un léger écrouissage entre 0mm,5 et 1 millimètre est donc préférable, l'allongement sous la tension de 3kg,8 n'existant plus dès 0mm,5 d'écrouissage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'influence de l'amplitude sur le nombre des oscillations avant rupture est donnée par le graphique 6.

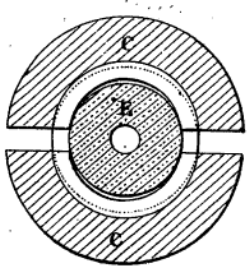
Gr. 6.



Enfin, des entretoises de 26 millimètres de diamètre ont donné, toutes choses égales d'ailleurs, des résultats toujours moindres que ceux des entretoises de 25 millimètres essayées dans les mêmes conditions.

Ces essais sont très délicats, l'encastrement jouant un rôle prépondérant dans le nombre d'oscillations obtenues. Ainsi on a doublé le nombre des oscillations en encastrant dans des demi-coquilles en acier qui avaient une différence de diamètre très difficilement mesurable avec le diamètre des entretoises. Les coquilles C (fig. 7) n'encastraient l'entretoise E qu'au voisinage de la ligne neutre, laissant deux vides au haut, et au bas n'atteignant certainement pas $0^{mm},1$.

Fig 7.



En essayant avec des demi-coquilles en cuivre qui fléchissaient sous le serrage énergique de l'encastrement et dont les filets étaient en tension de toutes parts sur les filets de l'entretoise, on a au contraire diminué de moitié le nombre des oscillations.

Cela explique les variations considérables données par des éprouvettes prises dans une même barre et l'enchevêtrement de courbes faites avec des cuivres différents.

Enfin, en essayant des entretoises à l'état de livraison, sans tension représentant la pression dans la chaudière, on a trouvé des résultats rentrant dans ceux faits avec tension de $3^{kg},8$ par millimètre carré, toutes choses égales d'ailleurs.

Conclusions :

1° La fatigue due aux déplacements relatifs de $1^{mm},75$ de demi-amplitude prime celle due à la tension de $3^{kg},8$ par millimètre carré donnée par la pression dans la chaudière;

2° Les essais de flexion sur encastrement donnent des résultats peu précis, en raison de la difficulté qu'il y a à assurer un encastrement parfait.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DEUXIÈME PARTIE

MÉTAUX AUTRES QUE LE CUIVRE ROUGE

ÉTATS CHIMIQUES ET PHYSIQUES

Les métaux essayés sont :

1° Le cupro-aluminium à 5 % de Al écroui;
2° Le cupro-aluminium à 7,5 % de Al recuit;
3° Le cupro-manganèse à 4,5 % de Mn;
4° L'acier extra-doux.

Les résultats d'analyses chimiques sont :

Cuivre	95,12	%
Aluminium	4,88	»
(Pas d'autre corps en quantité dosable.)		
Cuivre	92,25	%
Aluminium	7,4	»
Phosphore	0,06	»
Fer	indosable.	
Cuivre	94,45	%
Nickel	0,61	»
Manganèse	4,58	»
Silicium	0,14	»
Fer	traces indosables.	

L'acier extra-doux répondait aux conditions du cahier des charges spécial pour tirants :

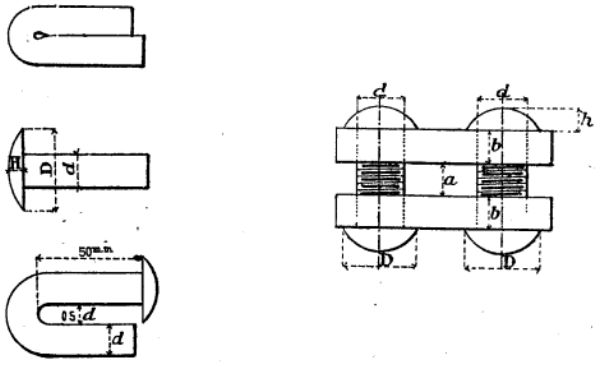
1° Pliage à chaud en une chaude à bloc, redressement et pliage à bloc en sens inverse, enfin redressement, obtenus sans criques (Diamètre de l'œil 5 millimètres maximum);

2° Épreuve de rivure à chaud, sans défaut :

$$D = 2{,}5\,d; \qquad H = 0{,}5\,d.$$

3° Épreuves de pliage avant et après trempe :

— sur le rivet déjà formé;
— sur un morceau trempé à 700° dans de l'eau à 28°;



4° Épreuves de rivures après filetage, à froid et après chauffage :

$a = 15$ millim minimum. $b = 20$ millim. $D = 1{,}5\,d$. $h = 0{,}5$.
Pas de 2 millimètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le même essai devra être reproduit après un chauffage au jaune (1100° environ) et trempe à l'air;

5° Épreuve de traction :

$$36 \text{ kg} < R < 42 \text{ kg} \qquad \text{Moyen minimum : } 38 \text{ kg.}$$

$$25\ \% < A \qquad \text{Moyen minimum : } 28\ \%$$

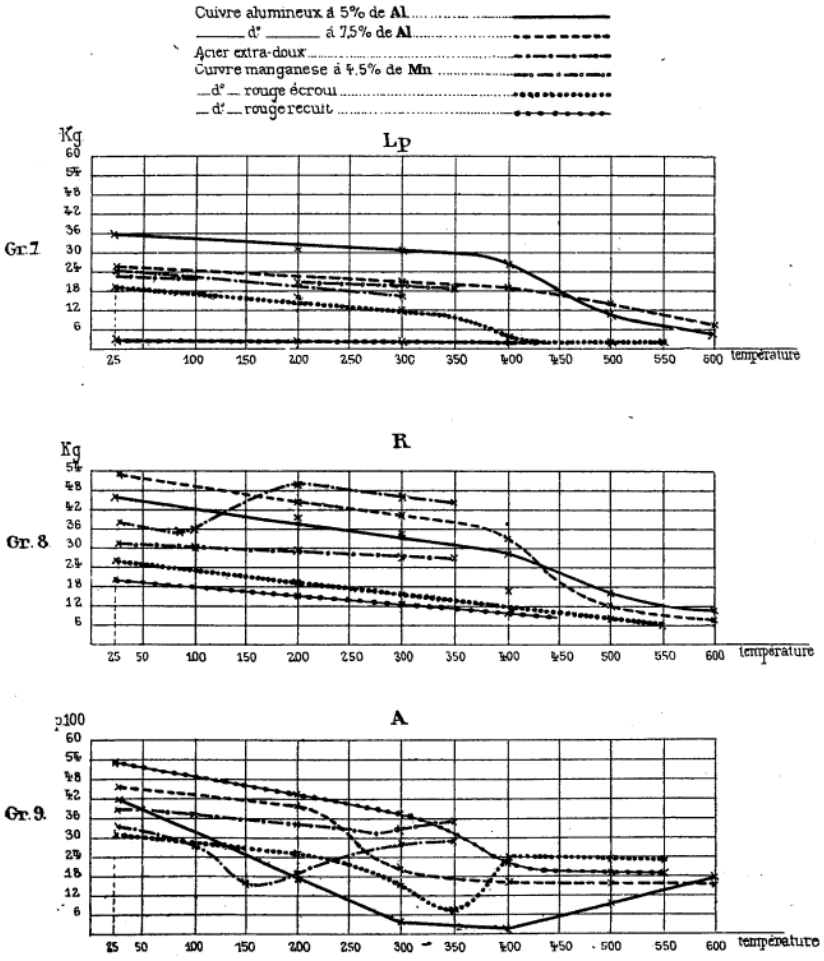
$$100 \left(\frac{S - S'}{S}\right) > 55.$$

Les résultats des essais de traction et de cisaillement sous tension à différentes températures sont donnés au paragraphe suivant.

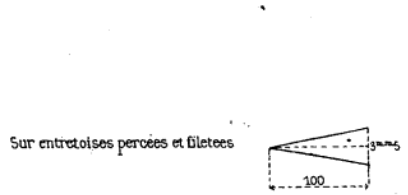
TROISIÈME PARTIE

COMPARAISON DES DIFFÉRENTS MÉTAUX

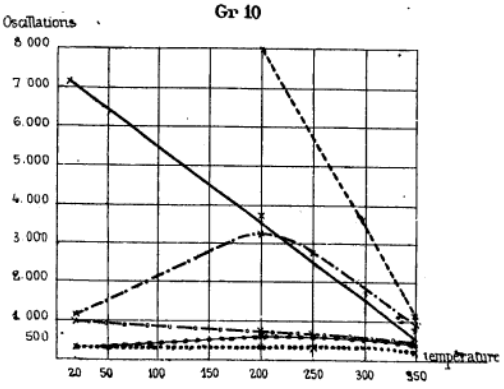
Les graphiques 7 à 11 donnent les résultats des essais de traction sur barres pleines tournées et de cisaillement sur entretoises de 25 millimètres sous tension. Ces essais ont été effectués à différentes températures.



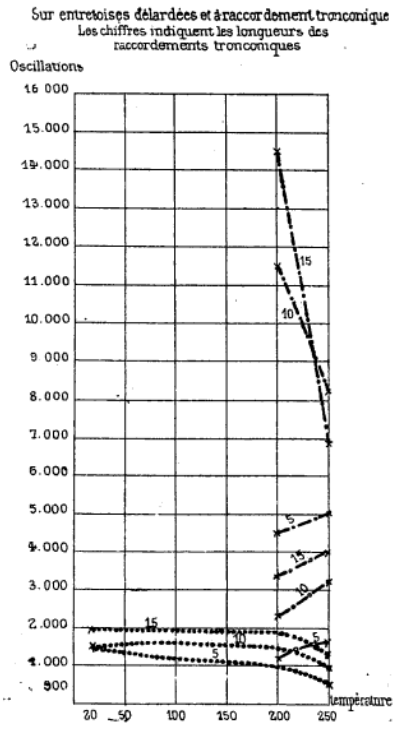
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Gr 10



Gr 11



Les essais de traction montrent :

1° Que, sauf pour l'acier, qui passe par un minimum de résistance vers 80° et par un maximum vers 200°, les Lp et les R décroissent régulièrement avec la température, jusqu'au moment où le recuit est influencé par la température;

2° Que les allongements décroissent avec la température, passent par un minimum, puis croissent jusqu'aux températures de forge probablement. L'acier présente son minimum à une température bien plus basse que les autres, vers 150°;

3° Que le métal le moins sensible à la chaleur est le cupro-manganèse. Les plus sensibles sont les cupro-aluminium, l'acier entre 100° et 200° étant mis à part.

Les essais de cisaillement sous tension ont montré :

1° Que, plus le métal est résistant à la traction, plus il donne d'oscillations sans rupture, sauf pour l'acier à chaud, et le cuivre recuit qui est influencé plus que les autres par la tension;

2° Que la sensibilité des cupro-aluminium à la chaleur se conserve à cet essai, le peu d'influence de la température sur le cupro-manganèse restant le même;

3° Que les éprouvettes à raccordement tronconique donnent des résultats nettement supérieurs, aussi bien à chaud qu'à froid.

Conclusion. — Les alliages de cuivre et d'aluminium donnent les meilleurs résultats d'ensemble à ces essais.

Les essais communiqués par M. Stone ont montré que l'entretoise flexible qu'il préconise donne des résultats supérieurs à l'entretoise filetée ordinaire, à l'essai de cisaillement sous tension.

Ceux communiqués par M. Speier ont confirmé l'insensibilité du cupro-manganèse à la chaleur, au point de vue de l'essai de traction.

Les essais de flexion circulaire sur encastrement publiés par l'« American Engineer » de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

septembre 1898 (p. 300) montrent, comme ceux relatés précédemment, les différences considérables des nombres de flexions obtenus dans un même métal (fer).

Je suis d'un avis opposé à l'auteur de cet article, en ce qui concerne le manque d'amélioration due au délardement, et d'accord avec lui au sujet de l'augmentation désirable de la longueur des entretoises.

QUATRIÈME PARTIE

RÉSULTATS EN SERVICE

I. — CASSURES DES ENTRETOISES.

En service, les entretoises se cassent généralement au ras de l'encastrement dans la tôle d'acier, enveloppe de foyer. Cependant il s'en casse un petit nombre contre la paroi en cuivre.

Ces faits montrent que ce n'est pas la chaleur uniquement qui fait casser les entretoises, puisqu'elles se rompent le plus souvent au point le moins chaud, alors que leur résistance, aux températures voisines de celle qu'elles atteignent en service, varie régulièrement.

La rupture, ayant lieu au ras de l'encastrement, montre que ce n'est pas en général la traction qui fait rompre les entretoises. Dans cette dernière hypothèse, on observerait des cassures en plein corps, ne fût-ce qu'aux points défectueux créés forcément par le perçage en deux fois des entretoises d'une certaine longueur.

Les textures des entretoises rompues en service présentent les caractéristiques suivantes : 1° une partie matée M plus ou moins importante (fig. 8) produite par les mouvements des deux parties de l'entretoise, dès qu'elle est fissurée ; 2° une partie fraîche *f* cassée en retirant l'entretoise, dès qu'on s'est aperçu qu'elle donnait lieu à une fuite.

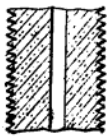


Fig. 8.

La cassure est le plus souvent complètement plane, ou du moins très peu contournée (en forme de coupelle). Dans un essai à la traction d'entretoise percée et filetée, la cassure est toujours en forme de coupelle jusqu'au delà de 300° (température non atteinte dans le service, comme nous l'avons expliqué précédemment). Au cisaillement sous tension, au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

contraire, la cassure est toujours plane à n'importe quelle température (sauf pour les éprouvettes à raccordement, en cuivre recuit, qui se strictionnent notablement).

Conclusion. — On peut donc dire que les entretoises se cassent généralement au cisaillement; mais des cassures par traction se rencontrent.

II. — LOCALISATION DES CASSURES DANS LES FOYERS.

On a tenu au Service de la Traction de la Compagnie de l'Est une statistique des entretoises rompues, pour plusieurs séries de machines à grande vitesse, de formes de foyer différentes.

Les graphiques et figures ci-après indiquent les nombres de ruptures sur les flancs de ces machines.

Ils donnent lieu aux observations suivantes :

1° **Machines à fermes**, série 800. — Figures 9 et 10; graphiques 12 et 13 (résultats pour 17 machines).

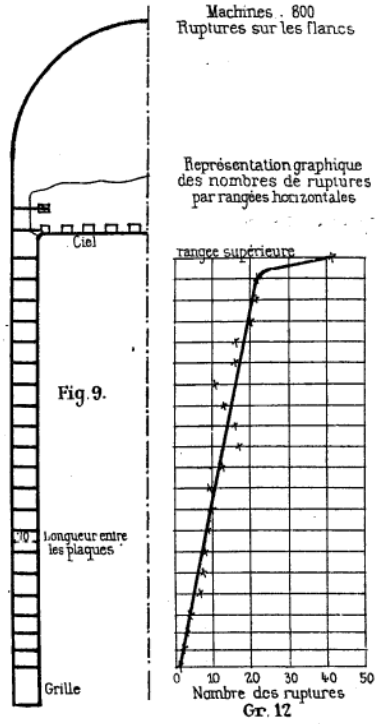


Fig. 9. Gr. 12

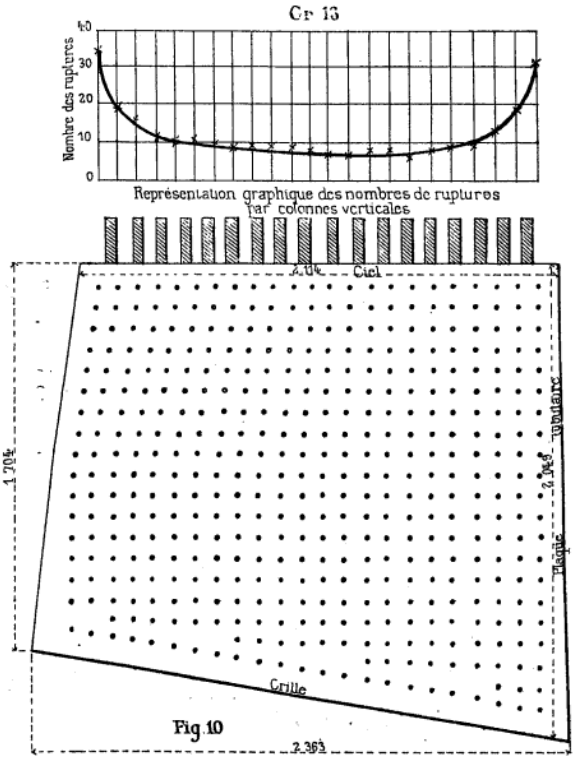


Fig. 10

Dans ces machines, les entretoises ont toutes la même longueur et sont toutes horizontales et normales aux deux tôles.

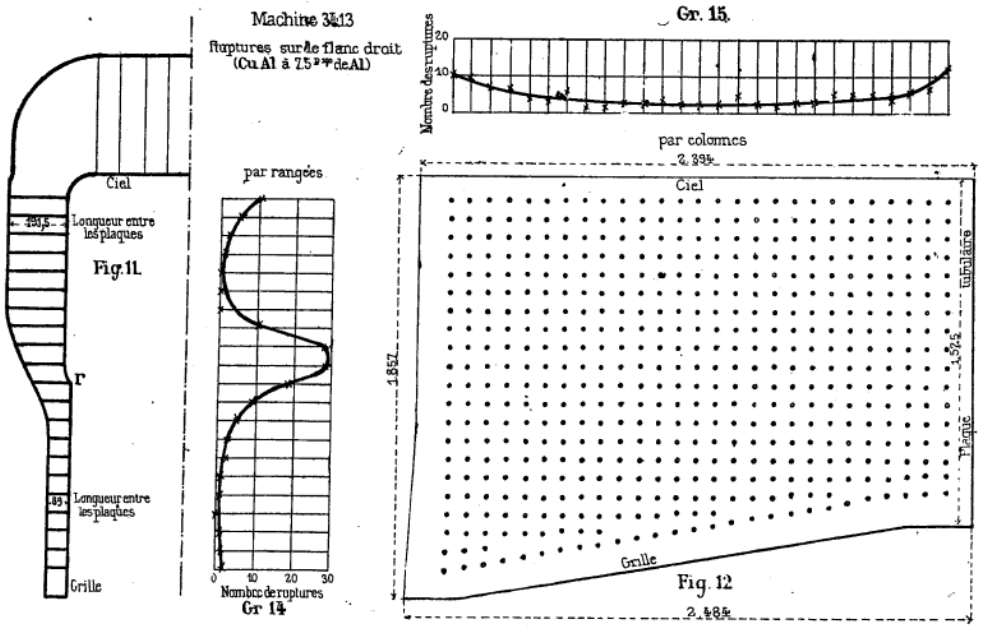
Le graphique 12 (fig. 9) des flancs, dans lequel les abscisses sont proportionnelles au nombre d'entretoises rompues dans la même rangée horizontale, montre que le minimum de rupture a lieu près du cadre et le maximum à la dernière rangée (près du ciel). Il indique que l'entretoise se casse d'autant plus facilement que le mouvement relatif des deux tôles est plus grand (rupture au cisaillement sans que la pression intervienne).

Le graphique 13 (fig. 10) a ses ordonnées proportionnelles au nombre d'entretoises rompues dans une même colonne.

La forme générale en coupelle de la courbe montre que les colonnes extrêmes AV et AR cassent plus facilement leurs entretoises que la partie centrale (axe vertical du flanc). Ce sont celles qui travaillent le plus au cisaillement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° **Foyers type « Belpaire »**. — Les figures 11 et 12, graphiques 14 et 15, donnent les résultats pour un foyer de ce genre.

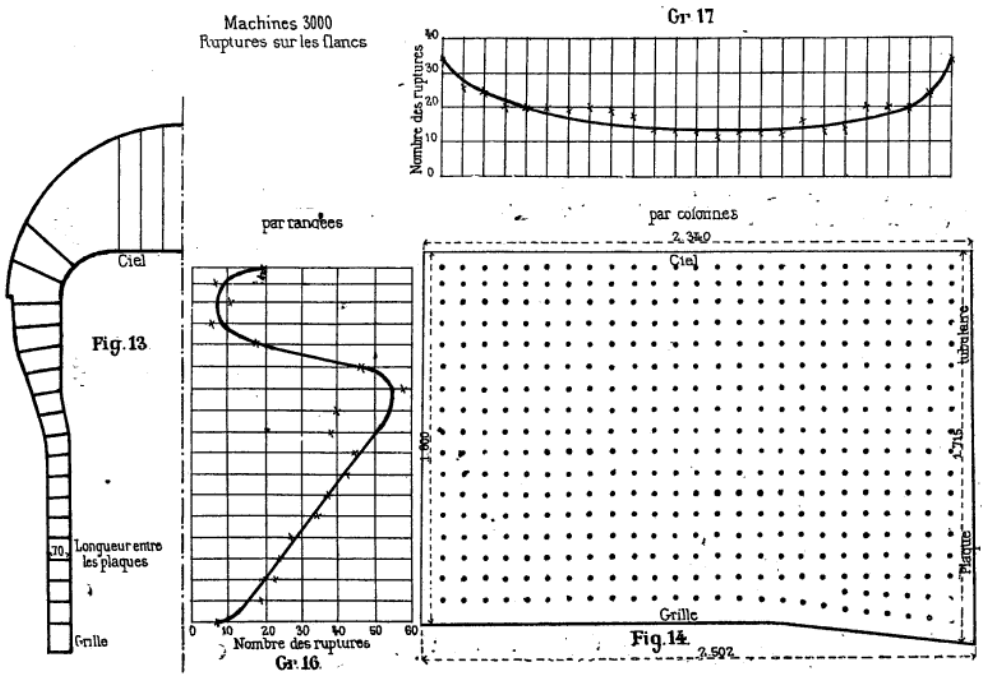


Les entretoises sont toutes horizontales, de longueurs variables, plus longues au ciel qu'au cadre. Un certain nombre est oblique à la tôle d'acier; elles sont, sauf dans la rangée r, normales à la plaque de cuivre.

L'examen du graphique 14, dans lequel les abscisses sont proportionnelles au nombre des entretoises cassées dans la même rangée horizontale, montre que les entretoises obliques dans la tôle d'acier se cassent le plus facilement. Les entretoises des rangées supérieures se cassent également plus que celles des autres rangées normales aux deux tôles.

Le graphique 15 montre la même allure en coupelle que le graphique 13, le nombre des cassures va en croissant à partir de l'axe vertical du flanc jusqu'aux extrémités.

3° **Foyers à tirants et boîte à feu à ciel cintré.** — Les figures 13 et 14, graphiques 16 et 17, donnent les résultats pour 14 machines.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les entretoises (fig. 13) sont de longueurs croissantes du cadre au ciel et plus ou moins obliques dans les deux tôles.

Le graphique 16 montre que les entretoises d'une même rangée se cassent d'autant plus facilement : 1° que la différence de dilatation est plus grande; 2° que les entretoises sont moins longues; 3° qu'elles sont plus obliques.

Le graphique 17 montre la forme en coupelle comme dans les autres machines.

La statistique montre aussi que les entretoises se rompent souvent par série. Les entretoises voisines d'une entretoise rompue, ayant à supporter une charge due à la tension de plus en plus considérable à mesure que les ruptures se produisent, cela explique les cassures à la traction trouvées à l'examen des textures de certaines entretoises rompues.

Conclusions. — Les conclusions théoriques à tirer de ces renseignements, au point de vue de la construction des chaudières, semblent être les suivantes :

1° Prohibition des entretoises obliques;

2° Augmentation de l'épaisseur de la lame d'eau (longueur des entretoises) à mesure que les dimensions de longueur et de hauteur du foyer augmentent;

3° Augmentation progressive, autant que faire se peut, de la longueur des entretoises, en partant du cadre vers le ciel.

III. — COMPARAISON DES MÉTAUX EN SERVICE.

Les métaux comparés sont :

le cuivre rouge écroui;
le cupro-aluminium à 5 % de Al écroui;
le cupro-aluminium à 7,5 % de Al recuit;
un cupro-manganèse à 4 % de Mn (d'une provenance différente de celle étudiée précédemment).

(Les essais sur l'acier ne sont pas encore assez avancés pour être résumés.)

Le cuivre rouge écroui a donné un nombre moyen de ruptures de 0,432 pour 1000 kilomètres sur 17 machines série 800 ayant fait un parcours moyen de 370 000 kilomètres.

Le cupro-aluminium, à 5 % de Al écroui[1], a donné un nombre de rupture de 2,670 pour 1000 kilomètres sur une machine série 800 et un parcours de 124 000 kilomètres. L'essai a été interrompu à la suite de ces mauvais résultats. Le cupro-aluminium a été remplacé par du cuivre rouge écroui.

Le cupro-manganèse n'a pas cassé après un parcours de 150 000 kilomètres, série 800; mais 199 entretoises des rangées inférieures (près de la grille) ont été remplacées par du cuivre rouge écroui, les gouttes de suif étaient rongées et le métal restant ne permettait pas leur reformation.

Enfin, le cupro-aluminium à 7,5 % de Al recuit, sur une machine 3400, a donné lieu à 2,252 ruptures pour 1000 kilomètres pour un parcours de 59 000 kilomètres; aucune entretoise en cuivre rouge montée symétriquement (voir Appendice), sur la même machine, ne s'étant cassée.

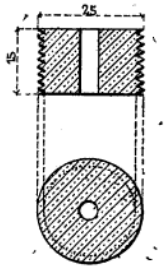
Ce qui étonne le plus dans cette question complexe, c'est de voir que les alliages (Cu Al) qui donnent les meilleurs résultats aux essais se comportent le plus mal en service! Le raisonnement qui tente le plus un essayeur de métaux est de dire que le métal mis en service n'est pas le même que celui essayé et qu'il a subi une transformation qui lui a fait perdre ses propriétés. Cette diminution de qualité ne peut alors être attribuable qu'aux opérations de pose (rivetage et matage).

Pour se rendre compte de ce que pouvait faire subir au métal le travail au marteau, on a

1. Les barres en réserve de cupro-aluminium à 5 % restées en magasin se sont fendues longitudinalement. Ce phénomène, que l'on rencontre dans certains laitons, suffit pour faire écarter ce métal de la construction, puisqu'il indique que ses molécules sont dans un état d'équilibre instable.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

frappé avec un mouton sur des éprouvettes dites « crushers », constituées par des bouts d'entretoise filetés et percés, de 15 millimètres de hauteur, jusqu'à ce qu'on les eût ramenés à $8^{mm},4$. Cela représente l'aplatissement donné au marteau pour former la goutte de suif.



Le mouton pesait 50 kilogrammes et tombait d'une hauteur fixe de $0^{m},25$.

Les résultats suivants ont confirmé la dureté du cupro-aluminium :

Cuivre rouge	12 coups
Cupro-manganèse	19 —
Acier extra-doux	32 —
Cupro-aluminium à 5 %	39 —
Cupro-aluminium à 7,5 %	48 —

D'après les renseignements fournis par le fabricant, les cuivres alumineux sont très difficiles à étirer et deviennent cassants, dès qu'ils sont écrouis. Ils présentent donc une difficulté de rivetage considérable sous tous les rapports.

Conclusion. — L'opération du rivetage a pu faire perdre aux alliages de cuivre et d'aluminium la suprématie qu'ils possèdent aux essais; ceux-ci ne tiennent pas compte des déformations permanentes qu'entraîne la pose actuelle.

CINQUIÈME PARTIE

CONCLUSIONS FINALES

I. — MÉTAUX A CHOISIR.

Dans l'état actuel de la question (acier réservé), le métal qui donne le moins de ruptures est le cupro-manganèse. Mais il se comporte mal sous l'action directe des flammes; il doit donc être réservé pour les lignes d'entretoises qui se cassent le plus souvent et se trouvent d'ailleurs les plus éloignées du combustible en ignition.

Le meilleur est ensuite le cuivre rouge, pour lequel la résistance à la traction doit être limitée entre un maximum et un minimum. On évitera ainsi le cuivre recuit et le cuivre trop écroui.

II. — FORME ET DIMENSIONS DES ENTRETOISES.

L'entretoise délardée à raccordement tronconique doit donner des résultats plus satisfaisants que celle filetée sur toute sa longueur. Pour un délardement de 2 millimètres sur le diamètre de fond de filet, un raccordement de 10 à 15 millimètres de longueur serait le meilleur (entretoises de 25 millimètres de diamètre.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les entretoises, dans l'état actuel de la question, périssant plus par cisaillement que par traction, il est inutile d'en augmenter le diamètre, ce qui rend le travail de cisaillement plus dangereux.

On devrait donc remplacer les entretoises cassées par des entretoises délardées. La prolongation de durée due à cette forme compensera largement l'influence défavorable de l'augmentation indispensable du diamètre de l'entretoise remplaçante.

Un travail de $3^{kg},8$ par millimètre carré peut être considéré comme un travail très admissible, pouvant être quelque peu dépassé.

III. — POSE

Dans mon opinion, le travail de pose a une influence néfaste. Il y a lieu d'étudier les moyens d'obtenir l'étanchéité, soit par dudgeonnage, soit par filetage cône, soit par un écrou formant joint sur la tôle, soit par tout autre moyen réduisant au minimum l'effet des coups de marteau sur la pièce maintenue par un filetage et un turc.

SIXIÈME PARTIE

APPENDICE

DESCRIPTION DES OPÉRATIONS ET APPAREILS D'ESSAIS

ÉTUDE DE L'ÉCROUISSAGE

On étirait les barres par passes de 1 millimètre et de $0^{mm},5$ à la filière à froid; elles subissaient deux à deux le même traitement. La deuxième barre de chaque série ne servit que pour les derniers écrouissages.

Les barres initiales de 32 millimètres de diamètre furent ramenées à 27 millimètres avant tout prélèvement, puis recuites. On a alors prélevé 2 barreaux de traction et 4 barreaux de pliage. On fit les mêmes prélèvements après chaque passe.

Traction. — L'épreuve de traction était faite sur éprouvettes tournées par passes aussi faibles que possible. La réduction de diamètre de la partie calibrée était de 2 millimètres.

Les limites des allongements proportionnels étaient observées : 1° au compas, avec retour à 0 à l'usine; 2° au moyen de la courbe de l'enregistreur monté sur la machine de traction installée dans l'atelier des essais de la Compagnie de l'Est, à Paris. En général, l'enregistreur a donné des chiffres plus faibles que le compas.

Les points du graphique sont obtenus par une moyenne de deux éprouvettes.

Pliages. — L'essai était arrêté lorsque la crique du fond du filet atteignait 1 millimètre d'ouverture.

Les angles de pliage étaient mesurés sur des diamètres d'éprouvette décroissants. On a donc ainsi relevé des angles trop petits.

Les angles de pliage du graphique sont la moyenne de deux essais.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ÉTUDE DE LA TEMPÉRATURE EN SERVICE

On a placé, dans le trou de plusieurs entretoises, des petites baguettes de divers métaux dont la fusibilité variait de 226° à 440°. Ces baguettes ont été placées dans 12 groupes de 6 entretoises chacun, dont 2 sur la plaque AR, 3 sur la plaque AV et 7 sur un des flancs, au-dessus et au-dessous de la voûte en briques de machines à grande vitesse (série 800).

Les baguettes remplissaient exactement les trous, et leurs extrémités avaient été affleurées avec la tête de l'entretoise à l'intérieur du foyer.

A chaque descente de service, on relevait la longueur des parties fondues. On a constaté, après deux descentes de service, que les variations étaient relativement faibles, aussi on n'a relevé finalement que les longueurs fondues au moment où l'essai a pris fin.

Les trois machines sur lesquelles l'essai a porté ont fait respectivement : 34 000 kilomètres, 8400 kilomètres et 13 500 kilomètres pendant la période des essais.

ÉTUDE DE Lp — R — ET A % — A DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES

L'éprouvette était montée sur une machine « Thomasset ». On la chauffait avec un four à gaz pour le cuivre rouge et les Cu Al; dans un bain d'huile ou de mélange d'azotates de potasse et de soude, pour les autres métaux. La température était donnée par un pyromètre « Le Châtelier » ou par des thermomètres, suivant le mode de chauffage.

On notait :

1° La température initiale;

2° La Lp, au moyen de l'oscillation de la colonne de mercure et du diagramme enregistré par la machine;

3° La charge totale de rupture;

4° L'allongement % sur $\sqrt{66{,}67\ S}$;

5° La température finale.

Pour les éprouvettes filetées et percées, on admettait pour S la section théorique du cercle au fond de filet diminuée de la section théorique du trou rond de 6 millimètres.

Les chiffres des courbes représentent chacun la moyenne de 18 éprouvettes pour le cuivre rouge et de 3 éprouvettes pour les autres métaux.

Influence du recuit. — On chauffait lentement dans un four à gaz, à la température indiquée et on maintenait la température pendant 25 minutes. La température était donnée par un pyromètre « Le Châtelier ». Le refroidissement avait lieu à l'air libre.

Chaque essai porte sur un groupe de 3 éprouvettes.

CISAILLEMENT DES ENTRETOISES EN SERVICE

On mesurait :

1° La dilatation de la boîte à feu, au niveau de la face de portée des fermes sur les corbeaux, ou au niveau de la première rangée supérieure d'entretoises des flancs;

2° La dilatation du sommet de la boîte à feu;

3° La dilatation du foyer, au moyen de jauges froides traversant la boîte à feu et reposant sur le ciel du foyer, dans l'axe longitudinal de la chaudière.

Les différences de dilatation entre le foyer et la boîte à feu sont très difficiles à relever, surtout sur les chaudières de grandes dimensions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ESSAIS DE CISAILLEMENT SOUS TENSION

Les courbes portent sur une moyenne de 3 éprouvettes pour chaque point.
Les températures étaient obtenues au moyen de bains d'huile ou de mélanges d'azotates.

APPAREILS D'ESSAIS

MACHINE DE TRACTION

C'est une machine Thomasset de 25 tonnes, à enregistreur Richard. Elle a été tarée par comparaison avec les machines des Compagnies du Nord et du Paris-Lyon-Méditerranée avant les expériences. Les machines concordaient entre elles à moins de 1 % près.

APPAREILS DE CHAUFFAGE ET DE MESURE DE TEMPÉRATURE

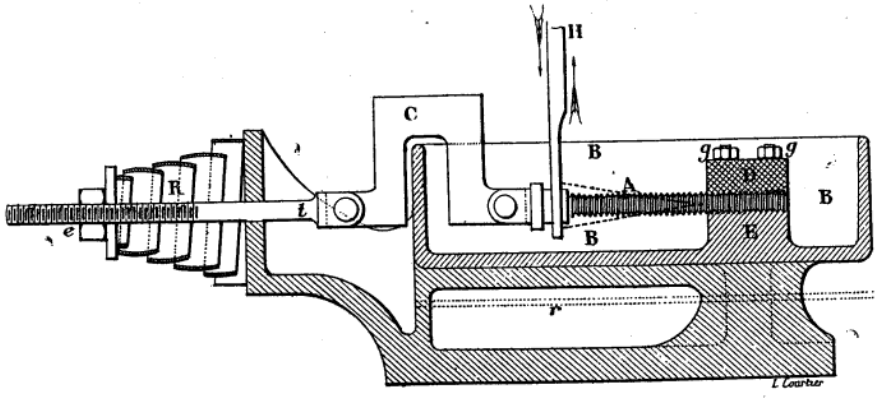
Pour la traction, on s'est servi de deux petits fours (de dimensions différentes) à brûleurs Bunsen, lorsque l'on prenait le pyromètre, et d'un bassin en cuivre chauffé par une rampe de gaz, lorsqu'on a pris les bains.

Le pyromètre a été taré sur place, au moyen des points d'ébullition de l'eau, de la naphtaline, du soufre, du sélénium et de fusion de l'or. La courbe a été vérifiée, à plusieurs reprises, au moyen de thermomètres jusqu'à 400° et par les mêmes ébullitions pour les autres points. L'exactitude des indications était de 5° en moyenne, le plus grand écart constaté a été de 10°.

Le pyromètre a été abandonné et remplacé par des bains, pour éviter la confection d'éprouvettes coûteuses dans le cas (acier) de métaux dont la résistance augmente avec la température pendant une certaine période et qui se cassaient pour cette raison hors du four (près des mordaches) avec des éprouvettes ordinaires.

CISAILLEMENT SOUS TENSION

On s'est servi d'une mortaiseuse pour produire les mouvements alternatifs. L'appareil avait la disposition indiquée par le croquis ci-dessous.

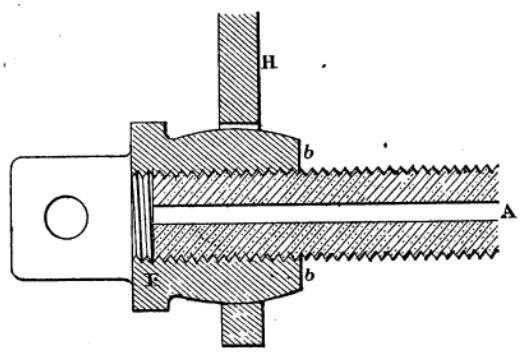


Un bassin en fonte B, chauffé à la partie inférieure par des rampes à gaz r, contient l'éprouvette A encastrée à une extrémité entre deux demi-coquilles serrées sur l'embase de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fonte E par un chapeau en acier D, au moyen de quatre goujons *g*. L'éprouvette reçoit un mouvement d'oscillation alternatif de la hache H de la mortaiseuse, sur le plateau de laquelle est fixé le bassin. Une pièce C transmet l'effort de traction du ressort R au moyen du tirant *t*. Le ressort est bandé sur une embase attenant au bassin au moyen de l'écrou *e*.

La hache transmet le mouvement à l'éprouvette, comme l'indique la figure ci-contre.



L'éprouvette A est vissée dans l'écrou à oreilles F, qui est assemblé par un boulon avec la pièce C de la figure précédente; la hache H porte une fenêtre dans laquelle passe l'écrou F. Le vissage de l'écrou est libre à la main, il n'y a donc pas encastrement de ce côté de l'éprouvette.

La distance de 100 millimètres pour la longueur d'éprouvette fléchie est comptée de la face *b* de l'écrou F à l'encastrement. Elle est réglable à 1 millimètre près.

L'amplitude était réglée à $0^{mm},1$ près; elle était la même pour toutes les éprouvettes.

Le nombre d'oscillations était donné par un compteur actionné par la hache. Le bruit que fait l'éprouvette en se rompant permettait de noter le nombre d'oscillations avant rupture.

La température était donnée par des thermomètres et ne variait pas de plus de 5° pour chaque éprouvette pendant l'expérience.

RUPTURES EN SERVICE

Les machines munies d'entretoises en cupro-aluminium et en cupro-manganèse avaient un flanc entretoisé en cuivre ordinaire, un flanc en alliage, une demi-face AV et AR en cuivre ordinaire et une demi-face AV et AR en alliage.

LE BLANT.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

XIV

SUR LES

ESSAIS DES PIÈCES EN CUIVRE ROUGE

ET EN LAITON

COMMUNICATION

Présentée par M. Émile DEMENGE

INGÉNIEUR MÉTALLURGISTE

Notre collègue, M. Baclé, a déjà traité la question devant la *Commission des méthodes d'essai des matériaux de construction* et sous une forme plus générale et plus complète, puisque dans son remarquable rapport les essais de tous les métaux autres que le fer étaient passés en revue. De plus, de nombreux tableaux résumés permettaient de comparer entre elles les conditions imposées par diverses administrations pour la réception des pièces. Notre travail est plus modeste et, profitant largement des études si documentées de cet ingénieur, nous nous sommes proposé simplement de les mettre à jour en ce qui concerne les essais des pièces en cuivre rouge et en laiton. Nous avons adopté une méthode analogue à celle de M. Baclé et reproduit en tableaux annexes les extraits de tous les cahiers des charges, que nous avons pu rassembler sur la matière.

Toutes les épreuves ou vérifications sont évidemment déterminées par le consommateur dans le but de s'assurer que les pièces livrées répondront bien, comme forme, comme dimensions et comme qualité, à l'usage auquel elles sont destinées. En rapprochant les conditions exigées de différents côtés pour les mêmes pièces, il est donc possible de tirer une conclusion utile au point de vue de l'uniformité si désirable des méthodes d'essai. D'autre part, certaines épreuves sont plus importantes et plus décisives que d'autres : quelques-unes font double emploi; d'autres sont très coûteuses et l'intérêt du consommateur n'est pas de montrer des exigences qui n'auraient d'autre conséquence qu'une augmentation du prix de vente des produits. De son côté, le fournisseur est le premier intéressé à diriger sa fabrication de telle sorte que les résultats des essais finaux soient satisfaisants, et, pour ne pas donner lieu à ses revendications en cas d'insuccès, il est nécessaire que les cahiers des charges ne contiennent aucune condition préliminaire contradictoire avec ces résultats. Nous nous permettrons de commenter les conditions imposées et essaierons de faire ressortir la valeur intrinsèque de chacune d'elles, leurs différences et quelquefois leurs contradictions, nous plaçant uniquement au point de vue de l'utilité générale et des intérêts bien entendus du consommateur aussi bien que du fournisseur, intérêts qui, en matière d'essais, doivent se résumer par cette formule : *demander ou donner les garanties les plus certaines pour la parfaite utilisation des pièces, sans avoir recours à des essais inutiles ou coûteux.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CUIVRE ROUGE

Le cuivre rouge, c'est-à-dire le cuivre à l'état à peu près pur, est utilisé sous quatre formes principales : en *barres*, en *fils*, en *tôles* ou *planches* et en *tubes*. Les barres servent à la préparation des entretoises pleines ou creuses des foyers de locomotives, des rivets, des ceintures, et d'une foule d'autres petites pièces rentrant dans la construction du matériel de guerre et de marine; les fils sont notamment employés par l'administration des Postes et Télégraphes en raison de leur grande conductibilité; les planches fourniront après emboutissage soit des foyers ou enveloppes de chaudières, soit des doublages ou feuilles de revêtement pour la marine; les tubes, soumis généralement à de fortes courbures, sont utilisés comme conduites de vapeur, d'eau ou d'air.

Étant donnée la grande influence des matières étrangères mélangées au cuivre sur ses propriétés mécaniques, on s'explique très bien l'importance qu'attachent tous les cahiers des charges à la pureté chimique du métal employé. Il est à regretter toutefois que les prescriptions des diverses administrations pour obtenir le même résultat soient aussi variées. Quelques-unes, à propos des matières étrangères tolérées, emploient simplement le mot *traces* sans le définir, ce qui ne fixe rien; d'autres imposent un maximum à l'oxydule contenu, ce qui n'est pratique que si l'on s'entend pour le doser. Certaines Compagnies se préoccupent beaucoup de la provenance du métal, soit en imposant l'emploi absolu d'une marque spéciale, soit en excluant les cuivres d'une région tout entière, soit enfin, ce qui paraît plus normal, en admettant une qualité équivalente au Corocoro. L'analyse finale permettant de s'assurer de la pureté chimique du produit, il serait naturel de laisser au fabricant plus de latitude dans le choix des matières. Du reste, il ne faut pas oublier qu'aujourd'hui les découvertes de bons gisements se sont multipliées, même dans les régions autrefois moins privilégiées, et que l'obtention des cuivres par l'électrolyse permet avec des marques très diverses d'arriver à la plus grande pureté recherchée.

Les proportions de matières étrangères généralement tolérées sont comprises entre 0,3 et 0,5 %, ce qui est facile à obtenir. Au delà de ce chiffre, comme semblent l'autoriser certains cahiers des charges, aucun des essais de refoulement et d'élargissement prescrits ensuite ne serait susceptible de réussir.

Quant à la densité, elle résulte évidemment de la proportion des matières étrangères adjointes au cuivre pur, et sa fixation fait double emploi avec la limitation de ces matières, lorsqu'elle est imposée.

Les tolérances admises sur les dimensions des pièces livrées sont souvent déterminées par des chiffres absolus, alors qu'elles devraient toujours être proportionnelles à leurs dimensions transversales. Quelques Compagnies se contentent d'un pourcentage sur le poids, ce qui est admissible, si le chiffre fixé n'est pas trop réduit.

En ce qui concerne les essais de traction, les dimensions des éprouvettes varient suivant les Compagnies : tandis que l'État Français et l'État Belge imposent une longueur déterminée de 200 millimètres avec une section de 500 millimètres carrés, l'Est, l'Ouest et l'Orléans se reportent pour en fixer les dimensions par voie de similitude à la formule $L^2 = 66.67\,S$, liant la longueur utile L à la section S; l'Artillerie admet une formule identique $L^2 = \frac{200}{3} S$, la Compagnie P.-L.-M. enfin prend pour base $L^2 = 80\,S$. La longueur du barreau et ses dimensions transversales ont évidemment une légère influence sur les résultats. Mais des essais de traction, quels qu'ils soient, ne peuvent jamais être regardés comme donnant des résultats absolus, et la considération du prix élevé du métal doit entrer en ligne de compte pour limiter autant que possible les dimensions des barreaux.

On sait que le cuivre, s'il est insensible à la trempe à l'eau, éprouve de grandes modifications de résistance et d'allongement lorsqu'il est écroui. La résistance moyenne d'un cuivre recuit peut être presque doublée par l'écrouissage, tandis que son allongement est réduit dans de très fortes proportions. L'état dans lequel se trouve le métal au moment de l'essai est donc à établir avant tout.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quelques Compagnies définissent l'état dans lequel le métal des éprouvettes doit subir la traction : c'est ainsi que P.-L.-M. pour les barres prescrit l'essai après recuit au rouge sombre; de même l'Ouest pour les planches et foyers distingue les cas où les barreaux sont ou non écrouis; l'Orléans, pour les foyers, dit que les éprouvettes seront découpées à froid et recuites; enfin, pour les tubes sans soudure, la Marine impose des essais à l'état recuit et non recuit.

Mais, généralement, les éprouvettes sont essayées dans l'état d'écrouissage ou de recuit où la pièce elle-même sera livrée, et, pour que cet état ne soit pas modifié au moment de leur préparation, il est nécessaire de surveiller avec grand soin cette opération et de suivre les règles établies par M. Baclé, qu'il n'est pas inutile de rappeler ici. « Il faut éviter toute déformation des barrettes et, si l'on est obligé de recourir au dressage, l'exécuter avec de grandes précautions et, autant que possible, avec des outils en bois et en cuivre; détacher par rabotage la zone altérée par le découpage préalable et terminer l'opération à la lime en adoucissant les arêtes vives; enfin éviter, pendant le tournage des éprouvettes rondes, de prendre de trop fortes passes et d'arrêter l'outil dans la longueur utile. »

En mettant de côté les conditions qui se rapportent à des éprouvettes préparées d'une façon particulière, nous avons rapproché dans le tableau suivant par ordre croissant des résistances les chiffres fixés par différents cahiers des charges pour les essais de traction de pièces destinées à des usages à peu près identiques et pour lesquelles, par conséquent, le degré d'écrouissage ne peut pas varier beaucoup :

BARRES			ENTRETOISES			PLANCHES			FOYERS		
ADMINISTRATIONS	R	A	ADMINISTRATIONS	R	A	ADMINISTRATIONS	R	A	ADMINISTRATIONS	R	A
	kg.	kg.		kg.	kg.		kg.	kg.		kg.	kg.
État . . .	22	30	État . . .	22	30	État . . .	20	22	Midi ou État.	20	30
Orléans. . .	22	36	Orléans . .	22	36	Nord. . . .	21,5	30	Nord	21,5	32
Artillerie . .	22	38	Est	22,5	32	Ouest . . .	22	25	Est.	21,5	38
Est	22,5	32	P.-L.-M. . .	24	22	Artillerie . .	22	38	Madrid-Cacerès .	22	22
État Belge .	24	24	État Belge..	24	24				Ouest. . . .	22	25
Ouest . . .	24	25	Ouest . . .	24	25				P.-L.-M. . .	22	28
			Nord. . . .	25	25				État Belge. .	22	35
									Ch. Orientaux.	22	38

On voit que pour les barres les résistances à la rupture varient de 22 à 24 kilogrammes, tandis que les allongements sont compris entre 38 et 24 %; pour les barres d'entretoise les limites des résistances sont 22 à 25 kilogrammes et celles des allongements 36 à 22 %; pour les planches 20 à 22 kilogrammes avec 38 à 22 %; enfin, pour les foyers 20 à 22 kilogrammes avec 38 à 22 %. Les grandes différences que l'on constate pour les allongements correspondant à une même résistance ne peuvent s'expliquer complètement par les variations qui existent soit dans l'état du métal ou sa composition, soit dans les dimensions des barreaux. Ainsi, lorsque pour la fourniture des foyers les Chemins Orientaux imposent avec 22 kilogrammes un allongement de 38 % tandis que la Compagnie de Madrid-Cacerès accepte 22 % dans les mêmes conditions, il n'est pas possible d'invoquer une autre explication qu'une appréciation très différente de la part des deux administrations qui ont à recevoir des fournitures identiques[1]

1. On peut observer que, pour un degré d'écrouissage déterminé, les caractéristiques mécaniques du métal dépendent exclusivement de son état de pureté et que, par conséquent, lorsqu'on limite la teneur des matières étrangères et qu'on se donne la résistance, le chiffre de l'allongement se trouve déterminé avec les quelques variations qui peuvent résulter des dimensions des éprouvettes et des circonstances particulières de l'essai. Sous ces réserves et dans les limites ordinaires d'écrouissage ou de recuit des cuivres, nous admettons entre les caractéristiques A et R la relation empirique suivante :

$$5{,}5\,R + A = 156$$

qui pourra servir à départager les exigences des cahiers des charges au point de vue des essais à la traction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour les tréfilés, le degré d'écrouissage varie nécessairement avec le diamètre des fils. Pour les fils de 2 à 5 millimètres, les Postes et Télégraphes imposent une résistance par millimètre carré allant de 44kg,6 à 38kg,19 avec un allongement maximum de 2 %, la Compagnie du Nord dans les mêmes limites passe de 45 à 30 kilogrammes pour la résistance et de 1 à 5 % pour l'allongement, et les essais correspondant aux diamètres compris entre 6 et 11 millimètres varient pour R de 30 à 20 kilogrammes et pour A de 5 à 15 %. Enfin, l'Artillerie pour les fils au delà de 2 millimètres se contente de 22 kilogrammes mais avec 40 % d'allongement, ce qui suppose le recuisage du fil avant essai.

Pour la réception des tubes, on ne demande généralement pas d'essai à la traction. Seules les Compagnies d'Orléans et du Midi ainsi que la Marine en exigent. Les barreaux sont pris soit dans le sens de la longueur, soit transversalement dans un morceau de tube scié suivant une génératrice et développé au maillet à froid et sans recuit. Les chiffres imposés se rapportent à des éprouvettes recuites ou non et sont loin de concorder comme on en peut juger.

		Orléans	Midi	Marine
Éprouvettes non recuites. . . .	R.	25 k.	27 k.	24 k.
	A.	27 %	»	22 %
Éprouvettes recuites.	R.	»	»	21 k.
	A.	»	»	38 %

Il est certain que l'indication sur métal recuit est intéressante pour les tuyaux de vapeur, car ceux-ci se recuisent au bout d'un temps plus ou moins long de service, sans compter que les extrémités des tubes portant des brides brasées et les parties cintrées se trouvent recuites avant la mise en place par suite de leur passage au feu[1].

On peut se demander si les conditions de résistance et d'allongement exigées concordent toujours avec l'état de pureté déterminé également par les cahiers des charges, et, à ce sujet, nous devons remarquer que le chiffre de 22 kilogrammes demandé pour la résistance par quelques cahiers des charges s'obtient très difficilement avec du cuivre à peu près pur. Et, cependant, il est parfois imposé sans tolérance ni compensation entre la résistance et l'allongement. C'est bien le cas de rappeler ici la très intéressante comparaison faite par M. Sauvage entre les résultats fournis par différentes éprouvettes de mêmes dimensions prélevées sur une même pièce et essayées dans les mêmes conditions de machine, de température et de durée. M. Sauvage en a tiré la conclusion, que la charge de rupture par millimètre carré et l'allongement proportionnel ne sont presque jamais des éléments rigoureusement déterminés et ne peuvent être connus qu'approximativement. Il est donc naturel, en présence d'une variation presque inévitable des charges et des allongements, de ne pas circonscrire ces caractéristiques entre des limites trop étroites.

Du reste, un grand nombre de Compagnies l'ont bien compris. La Compagnie de l'Est, par exemple, admet une tolérance de 3 kilogrammes pour les résistances et de 2 à 3 % pour les allongements, en étendant les conditions d'essai à la traction entre les limites suivantes :

	R	A %
Barres d'entretoises.	21 k. 5 à 24 k. 5	32 à 30
Foyers	20 k. 5 à 23 k. 5	35 à 38

Pour le calcul de la compensation entre le chiffre de la résistance et celui de l'allongement, aucune des formules employées $R+A=60$, $R\times A=770$, 1 kilogramme de résistance en moins moyennant 2 % d'allongement en plus, etc., ne se rapproche de la réalité, car il faut compter 5,5 % d'allongement pour compenser 1 kilogramme de résistance.

1. On sait, de plus, que la résistance du cuivre diminue avec l'élévation de température. M. André Le Chatelier a donné la formule empirique suivante qui détermine la résistance du cuivre aux différentes températures T et dans laquelle la valeur de la résistance du cuivre à 0° est comptée pour 21 kilogrammes.

$$R^{kg} = 21^{kg} - 0{,}025\,T.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Toutes les administrations, sauf deux, laissent de côté la limite élastique. On s'est rendu compte, en effet, des difficultés que présente sa détermination, puisque l'on ne s'entend même pas sur sa définition. Est-ce la charge maximum ne produisant pas l'allongement permanent, ou bien la charge au-dessous de laquelle les allongements sont sensiblement proportionnels aux charges, ou encore la charge au delà de laquelle les allongements croissent sensiblement sans augmentation de l'effort? Toutes ces définitions sont inaccessibles dans la pratique ou nécessitent certains systèmes de machines qu'on ne trouve pas dans toutes les usines.

La striction n'est imposée que par trois Compagnies. Les observations que M. Brustlein a jadis présentées au sujet de l'utilité de sa détermination dans les essais d'acier pourraient peut-être s'appliquer à ceux du cuivre. La résistance au pliage est en relation assez étroite avec la striction, tandis qu'elle ne l'est pas toujours avec l'allongement pour cent sur une longue éprouvette. La déformation locale maximum possible d'un métal étant la caractéristique la plus importante à connaître, ce serait une raison de plus de n'essayer le cuivre à la traction qu'avec de courts barreaux dans lesquels la striction jouerait le principal rôle.

Les épreuves de pliage prescrites par les cahiers des charges ne présentent pas généralement le caractère défini et uniforme qui serait désirable. Pour les barres, le pliage à bloc est toujours demandé. Seule la Compagnie de l'Ouest prévoit le pliage parallèle avec un rayon de raccordement égal à l'épaisseur, lorsque celle-ci dépasse 15 millimètres. Pour le fil, on compte le nombre de pliages : les Postes et Télégraphes exigent le nombre maximum de pliages (7) pour le fil de 3 millimètres; au delà et en deçà de cette dimension, ce nombre est réduit à 5 et à 4. De son côté, le Nord se contente de 5 pliages. Pour les planches, le pliage à bloc est imposé avec quelques exceptions. Au-dessus de 6 millimètres d'épaisseur, la Compagnie P.-L.-M. admet un simple pliage à angle droit et définit bien que l'épreuve aura lieu après recuit; la Marine accepte toujours le pliage dans les conditions précédentes. Par contre, l'Ouest jusqu'à 5 millimètres d'épaisseur fait 2 pliages complets l'un sur l'autre, le pliage à bloc simple étant réservé pour les tôles plus épaisses.

Pour les foyers, l'Est demande le pliage à bloc après trempe, opération qui, on le sait, laisse absolument insensible le cuivre comme le laiton; l'Ouest fait la même distinction que pour les barres au-dessus et au-dessous de 15 millimètres, le pliage complet étant réservé seulement aux planches d'épaisseur inférieure à 15 millimètres. L'essai se fait à froid, les éprouvettes sont préparées généralement en découpant dans les planches des bandes de 150 à 200 millimètres de longueur et de 30 à 40 millimètres de largeur. Une seule Compagnie fait exécuter le pliage sur une largeur de 50 à 60 millimètres, et cette simple augmentation paraît rendre l'essai plus dur. L'expérience suivante permet de s'en rendre compte, en même temps qu'elle montre la nécessité de toujours faire varier l'angle suivant les épaisseurs.

Si l'on prend une barre de cuivre bien calibrée, de 30 millimètres de largeur par exemple, et d'épaisseur e et que l'on trace au tire-ligne, dans la partie centrale, un certain nombre de divisions très rapprochées et bien également écartées (soit une graduation en 1/2 millimètres), on remarque qu'après l'essai de pliage à bloc les divisions sur chaque face du barreau se sont plus ou moins allongées à partir d'un certain point, et que l'ensemble de ces allongements partiels représentant l'allongement total des n divisions modifiées par le pliage est égal à 1,5 fois l'épaisseur $e = 1{,}5 \times e$.

Or, pour une épaisseur plus grande e', le nombre des divisions intéressées n' augmente aussi, mais beaucoup moins vite que l'épaisseur, de sorte que $\frac{l'}{l} < \frac{n'}{n}$ et on arrive bientôt à une épaisseur (pour $e = 20$ à 25 millimètres), pour laquelle le pliage à bloc d'abord difficile devient impossible. La largeur de l'éprouvette, à mesure qu'elle est augmentée, influe également sur la partie intéressée et paraît la diminuer.

Des essais de refoulement sont pratiqués sur les barres par la Marine et l'Artillerie. La Marine ramène à chaud à la longueur de 100 millimètres un bout de 200 millimètres, puis après équarrissage l'étire à chaud à 400 millimètres. L'Artillerie prend simplement un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

morceau dont la longueur égale la plus grande dimension transversale et l'écrase en forme de galette dont l'épaisseur correspond au 1/4 de la longueur primitive. Comme essai d'élargissement, la Marine fait percer un trou de diamètre égal à deux fois 1/2 le calibre de la barre dans un bout refoulé et aplati. De leur côté, certaines Compagnies de chemins de fer exigent un essai analogue pour la réception des barres d'entretoises. Des trous d'une profondeur déterminée, pratiqués en bout dans le sens de la longueur des barres avec un diamètre intérieur de 6 millimètres, et même de 8 millimètres, sont élargis respectivement à 12 millimètres et 16 millimètres. Ce genre d'épreuve est très délicat, et sa préparation entraîne une importante main-d'œuvre.

Une seule Compagnie demande sur les barres d'entretoises un essai de torsion, qui comporte 3 torsions de 360° à froid et 5 torsions de 360° au rouge sombre.

Pour les planches, certaines administrations ne se contentent pas des essais de pliage pour se rendre compte de la malléabilité du métal et imposent la fabrication coûteuse d'emboutis, qui vient évidemment grever le prix de revient des fournitures. Ce sont généralement des calottes sphériques de 200 millimètres de diamètre dont la flèche varie de 120 millimètres à 200 millimètres. On fait subir cet essai soit aux tôles d'épaisseur inférieure à $2^{mm},5$ ou à 5 millimètres, soit aux tôles dont l'épaisseur dépasse 3 millimètres. Quelquefois avec des tôles plus épaisses on emboutit un manchon cylindrique à collerettes.

D'autres essais sont encore pratiqués, qui ne servent qu'à la confirmation des épreuves précédentes. Ils consistent surtout dans la confection d'un tube plus ou moins gros, suivant l'épaisseur de la planche et son cintrage à angle droit avec un rayon de courbure intérieur égal à deux fois son diamètre. Pour les foyers, on fait aussi quelquefois des essais d'étirage en forme de pince et des pliages sur entaille.

La réception des tubes comporte un certain nombre d'essais spéciaux, et en premier lieu la préparation d'une collerette de 12 à 15 millimètres ou égale au 1/6 du diamètre extérieur, rabattue à froid avec un rayon de courbure ne dépassant pas l'épaisseur du tube. Cette épreuve se fait presque toujours par martelage à la main; quelquefois, pour s'affranchir de l'influence de l'habileté de l'ouvrier sur la réussite de l'essai, on demande l'emboutissage à la presse ou au pilon, mais cela entraîne le fournisseur à créer un outillage coûteux, chaque diamètre demandant un mandrin spécial. On procède ensuite au cintrage du tube en lui donnant un rayon de courbure égal à deux ou quatre fois le diamètre extérieur, suivant qu'il s'agit d'un tube sans soudure ou avec soudure. On effectue aussi généralement un retournement complet d'un bout de tube, scié suivant une génératrice; le même essai est prescrit pour les ceintures de projectile jusqu'à formation d'une boucle dont l'ouverture est égale à deux fois l'épaisseur. Des épreuves d'aplatissement et de pliage à bloc à froid et à chaud (rouge cerise naissant) sont imposées quelquefois pour apprécier comment le métal supporte l'action du feu au moment du travail. Enfin on demande, mais rarement, un évasement du tube au rouge cerise jusqu'à formation d'une collerette inclinée.

Les essais de pression se font avec la presse : ils ont lieu individuellement sur chaque tube se trouvant dans l'état où la fourniture est faite, c'est-à-dire écroui par la dernière passe d'étirage et non recuit. La charge dure une minute et est limitée à 20 kilogr. par centimètre carré pour les Compagnies de chemins de fer; la Marine a adopté les formules $P = 800\,\frac{E}{D}$ pour les tuyaux soudés et $P = 1100\,\frac{E}{D}$ pour les tubes sans soudure, formules dans lesquelles P est la pression en kilogrammes par centimètre carré, E et D l'épaisseur et le diamètre intérieur exprimés en millimètres. D'après ces formules la charge à laquelle est soumis le métal par millimètre carré de section des tubes est de 4 kilogrammes ou de $5^{kg},5$, et par conséquent inférieure à la limite élastique du métal écroui. Cette épreuve individuelle constitue donc un simple essai d'étanchéité. La Marine la complète par un essai d'éclatement sous pression : un bout de tuyau d'au moins 1 mètre de longueur est recuit au rouge très sombre, refroidi ensuite lentement à l'air et soumis à une pression hydraulique intérieure jusqu'à éclatement. La charge par millimètre carré de section du tube, qui correspond à la pression d'éclatement et qui résulte de la formule $R = \frac{PD}{2E}$, doit être de 15 kilogrammes au mininum, et la déformation permanente ne doit pas se manifester avant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que la pression intérieure n'ait atteint 3 kilogrammes, c'est-à-dire le 1/5 de la pression d'éclatement.

On remarquera qu'il n'existe pas d'épreuve spéciale pour soumettre le tube à une action simultanée de la pression et de la chaleur. C'est peut-être une lacune, car certaines qualités de cuivre se trouvent parfois dans un état moléculaire instable et l'élévation de température pourrait en révéler les solutions de continuité, lorsque celles-ci existent.

Les fils de cuivre rouge à haute conductibilité, destinés à l'administration des Postes et Télégraphes, subissent, outre les épreuves de traction ou de pliage, des essais de résistance électrique soit au pont double de Thomson, soit au pont de Wheatstone.

L'essai porte sur une longueur de 1 mètre dans le premier cas, et sur une longueur de 100 mètres dans le second : la longueur de l'échantillon varie en raison inverse du degré de précision que donne chacun des appareils.

LAITON

Les deux principaux métaux qui composent cet alliage, le cuivre et le zinc, affectent différentes proportions suivant l'usage auquel il est destiné. S'il doit être transformé en barres, qui serviront à la préparation d'objets courants n'ayant pas besoin de grande résistance, 60 à 62 % de cuivre sont suffisants [1]. Pour la fabrication du fil on emploie tantôt 65 %, tantôt 70 %. Les chemins de fer pour les planches et les tubes à fumée, la Marine pour ses doublages, ses tubes de condenseur, porte-voix, rambardes, etc., imposent 70 %. Quant au laiton destiné aux flans pour douilles et aux bandes pour cartouches, la Marine et la Guerre demandent 67 %. Cette qualité constitue alors un véritable métal chimiquement défini à cause des proportions de son dosage et qui, pour cette raison, est le plus facile à obtenir. Les tolérances sur la teneur en cuivre varient suivant les administrations de 0,5 à 1 % en plus ou en moins, et la proportion des matières étrangères est comprise entre 1/2 et 3 %. Pour les barres de laiton à décolleter, l'introduction de 1 % de plomb dans l'alliage sert à obtenir au tournage une poussière qui dégage l'outil. Quant à la petite proportion d'étain recherchée parfois, elle n'apporte, croyons-nous, aucune propriété spéciale au laiton. Le procédé d'analyse des laitons, tel qu'il est pratiqué généralement, a été exposé par M. Charpy devant la Commission des méthodes d'essai, et précisé par M. Hollard dans de nombreuses publications [2].

Les observations que nous avions faites concernant les tolérances sur les dimensions transversales des pièces de cuivre s'appliquent également aux pièces de laiton. Parfois ces tolérances ne sont pas accordées, et quand elles existent elles sont généralement absolues, au lieu d'être des parties aliquotes des dimensions, épaisseur et diamètre.

Les essais de traction se font presque toujours sur des éprouvettes de 100 millimètres de longueur et de 150 millimètres carrés de surface. Les résistances à la rupture demandées après recuit se tiennent aux environs de 30 kilogrammes par millimètre carré et les allongements entre 40 et 62 %. Le fil tréfilé doit donner 45 kilogrammes avec 15 %. L'influence de l'écrouissage sur le laiton est du même ordre que pour le cuivre; les mêmes précautions sont donc à prendre dans la préparation des éprouvettes si l'on veut éviter des mécomptes. Les compensations admises, 1 kilogramme de résistance pour 2 % et même 2,5 % d'allongement, sont insuffisantes et, comme pour le cuivre, il faut compter plus d'allongement pour compenser 1 kilogramme de résistance, aux environs du maximum de recuit.

Les barres sont examinées après décapage ou après enroulement à froid en forme d'anneau circulaire. Les fils subissent cinq pliages à 90° ou sont enroulés sur un manchon cylindrique en spires se touchant, et la surface intérieure du corps ainsi formé subit une certaine extension par le passage d'un mandrin plus gros. Pour la réception des planches, quelques

1. Les objets qui doivent être décolletés ou forgés à chaud ont un titre inférieur à 62; ceux devant subir de l'emboutissage ou de l'étirage à froid ont un titre supérieur.

2. Communication à l'Académie des sciences et articles publiés dans le *Bulletin de la Société chimique*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Compagnies de chemins de fer seulement exécutent le pliage à bloc d'une bande non recuite de 40 à 50 millimètres de largeur. Quant aux essais d'emboutissage qui présentent, comme nous l'avons déjà dit, l'inconvénient d'être très onéreux, ils sont prescrits par presque tous les cahiers des charges. Il s'agit toujours de la confection d'une calotte sphérique de 200 millimètres de diamètre avec 80 ou 120 millimètres de flèche; parfois on demande en plus la formation d'un tube. Pour les doublages de la Marine les feuilles sont examinées à la loupe après décapage. Enfin, les tubes sans soudure en laiton subissent une série d'épreuves très analogues à celles des tubes en cuivre : rabattement à froid d'une collerette de 15 millimètres de largeur ou d'une largeur égale à 1/10 du diamètre, dans certains cas retournement complet d'un échantillon, cintrage à froid d'un morceau de 700 millimètres recuit, rempli de brai, jusqu'à ce que ses extrémités se rejoignent; flexion d'un morceau de 700 millimètres non recuit rempli de brai jusqu'à une flèche de 80 millimètres.

Avec un mandrin ou avec un outil Caraman la Marine fait exécuter le renflement du tube à un diamètre supérieur de 1/10 au diamètre initial sur une longueur égale à une fois et demie le diamètre. Tous les tubes sont soumis à la presse hydraulique à une pression de 10 kilogrammes par centimètre carré (tubes de la Marine pour condenseurs), de 20 kilogrammes (tubes à fumée des locomotives), de 30 kilogrammes (tubes de la Marine pour chaudières). La Marine seule fait un essai de rupture sur un tube sacrifié, et cette rupture ne doit pas se produire sous une charge inférieure à 20 kilogrammes par mètre carré de section de métal (tubes de condenseurs), et à 24 kilogrammes (tubes de chaudières).

Pour terminer, nous exprimerons le vœu que d'une façon générale les cahiers des charges conservent leur caractère propre, et aient simplement pour objet de déterminer les conditions d'essais les plus convenables pour donner les meilleures garanties à l'emploi, mais qu'ils soient absolument muets en ce qui concerne les procédés et détails de la fabrication, afin de ne pas tuer l'initiative des industriels et de leur laisser, en même temps que leur responsabilité, le droit et le devoir d'améliorer et de modifier au gré de leurs recherches et de leurs expériences; nous voulons aussi appeler l'attention sur la composition des lots soumis en recette, question qui mérite évidemment considération, avec un métal aussi coûteux que le cuivre. Il nous paraît désirable que l'examen des pièces se multiplie d'autant plus qu'il s'agit de pièces plus importantes, ou, en d'autres termes, que le nombre des objets constituant un lot soit d'autant plus restreint que ces objets ont plus de valeur, pour arriver même en généralisant à la réception individuelle d'un objet à partir d'un certain degré d'importance.

Telles sont résumées les conditions actuelles des cahiers des charges concernant les fournitures des pièces en cuivre et en laiton, et les quelques observations auxquelles elles nous ont semblé donner lieu.

EMILE DEMENGE.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU I. — BARRES DE CUIVRE

DÉSIGNATION	P.-L.-M.	EST	OUEST	ÉTAT
Métal	Traces métaux divers. Pas sensiblement d'oxydule. Cuivre première qualité.	Cuivre première qualité. 0,003 matières étrangères.	Pas plus de 0,004 matières étrangères dont 0,0005 soufre.	Pas sensiblement d'oxydule. Métaux étrangers à l'état de traces.
Tolérances	Pas mention au cahier des charges.	»	Sur D ou E $\pm 0^{mm},2$.	»
Essais de traction	R = moy. 22^k pas moins de 18^k. Al = moy. 25 % pas moins de 22 %. sur éprouvettes de L = 200 env., S = 500^{mm} ou $L^2 = 80\,S$, recuites au rouge sombre.	R = minimum $21^k,5$ moy. $22^k,5$, max. $24^k,5$. All = min. 30 % moy. 32 %. Striction : $100\left(\frac{S-S'}{S}\right)$ S = section initiale. S′ = section réduite. sur éprouvettes de $L = \sqrt{66,67\,S}$.	R = 24^k. All = 25 % sur éprouvettes de 200 L 600 S ou $L = \sqrt{66,67\,S}$.	R = 22^k All = 30 % Élasticité = 10^k par m/m^2. sur éprouvettes de 200 L.
Pliage	Bout de 150^{mm} de long plié complètement.	»	Bout de 150^{mm} de longueur plié complètement lorsque $e < 15^{mm}$ jusqu'à parallélisme avec diamètre intérieur égal épaisseur lorsque $e > 15^{mm}$.	Bout de 150^{mm} de longueur plié complètement.
Refoulement	»	»	»	»
Filetage	»	»	»	En 2 passes { 1° chariotage, 2° filetage au profil, puis pliage.
Elargissement	»	»	»	»
Texture	Cassures aux deux bouts devant présenter une texture d'un rouge pâle à grains fins.	Texture parfaitement homogène d'un rouge pâle à grain fin.	»	Texture d'un rouge pâle à grains fins, parfaitement homogène.

DÉSIGNATION	ORLÉANS ET CHEMINS DÉPARTEMENTAUX	ÉTAT BELGE	MARINE	ARTILLERIE
Métal	0,002 oxydule, 0,002 étain, 0,001 divers { 0,005 maximum de matières étrangères.	Cuivre première qualité. Densité : 8,88. Métaux étrangers ou oxydes dissous seulement à l'état de traces.	0,01 de matières étrangères cuivres d'Espagne exclus.	0,004 matières étrangères.
Tolérances	»	Sur poids $\pm$ 5 0/0.	»	$\pm 2^{mm}$ sur longueurs $\leqslant 2^m$ 1^{mm} par mètre sur $> 2^m$ sur dimensions transversales + de $0^{mm},1$ à $0^{mm},5$.
Essais de traction	R = 22^k All = 36 % Striction = 60 % R + S = 82 sur éprouvettes de $100^{mm} \times 150^{mm^2}$ de section ou $70^{mm} \times 75^{mm^2}$ —	R = 24^k All = 24 % sur éprouvettes de L = 200^{mm}.	»	R = 22^k All = 38 % sur éprouvettes de $L^2 = \frac{200}{3}\,S$.
Pliage	Pliage complet sans criques.	»	»	Bout de 150^{mm} plié à bloc.
Refoulement	»	»	Bout de 200^{mm} refoulé à chaud à 100^{mm} puis équarri sur l'enclume et étiré à chaud à 400^{mm}.	Bout de longueur égale à plus grande dimension transversale, écrasé en forme de galette dont $e = 1/4$ de la plus grande dimension.
Filetage	»	Filetage en deux passes. Filet parfaitement lisse sans aucune trace d'arrachement ou d'égrènement.	»	»
Elargissement	»	»	Dans un bout refoulé et aplati on devra pouvoir percer un trou = 2 fois 1/2 le calibre de la barre.	»
Texture	Cassure fraîche doit être rose et soyeuse.	Cassure devant donner une texture d'un rouge rosé à grains fins.	»	»

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU II. — BARRES DE CUIVRE POUR ENTRETOISES

DÉSIGNATION	P.-L.-M.	EST	ÉTAT	ORLÉANS
Métal	Cuivre corocoro ou qualité équivalente. Pas sensiblement d'oxydule Traces métaux divers.	Cuivre première qualité. 0,003 matières étrangères.	Pas sensiblement d'oxydule. Métaux étrangers seulement à l'état de traces.	0,002 oxydule. 0,002 étain. 0,001 divers. maximum 0,005
Tolérances	Pas mention au cahier des charges.	Sur diamètre. $+0^{mm},2$ / $-0^{mm},1$. Ovalisation. . . $0^{mm},1$.	Sur diamètre. . $+0,1$ / -0	Calibrés à 0,1 près.
Essais de traction.	R moy. $= 24^k$ All $= 22$ % sur éprouvettes de L = 200 env., S = 500mm ou $L^2 = 80$ S.	R = minimum $21^k,5$ / moyenne. $22^k,5$ / maximum $24^k,5$ All = minimum 30 % / moyenne. 32 % Striction $= 100\left(\frac{S-S'}{S}\right)$ S = section initiale, S′ = — réduite, sur éprouvettes de $L = \sqrt{66,67\,S}$.	R = 22^k moyenne $= 24^k$ All $= 30$ % Elasticité $= 10^k$ par mm² sur éprouvettes de 200 de long. environ.	R = 22^k All = 36 % Striction = 60 % sur éprouvettes non recuites de L = 100 S = 150mm² ou L = 70 S = 75
Pliage	Bout de 150mm plié complètement.	Pliage d'un bout fileté.	Bout de 150mm plié complètement.	Bout de 150mm plié complètement.
Élargissement	Pas d'essai.	Seulement sur barres D ⩾ 20 % bout de 100mm, trou de 6mm et 25 de profond. Elargissement du trou à 12mm au moins à l'aide d'un poinçon à angle de 60°.	Pas d'essai	Pas d'essai.
Filetage	Filetage en deux passes seulement : 1° chariotage, 2° filetage au profil demandé.	Filetage d'un bout de 200 de long en deux passes : 1° chariotage, 2° filetage au profil, puis pliage au marteau jusqu'à parallélisme des deux branches. Ecartement : 24mm lorsque D < 24mm. Écartement au diamètre D ⩾ 24mm.	En deux passes 1° chariotage, 2° filetage au profil.	Filetage présentant des filets parfaitement lisses et sans arrachement et sans fissures longitudinales ou autres défauts.
Torsion	3 torsions de 360° à froid. 5 — 360° pour barres chauffées au rouge sombre.	Pas d'essai.	Pas d'essai	Pas d'essai.
Texture	Cassures aux deux bouts, la texture doit être d'un rouge pâle à grains fins.	Texture parfaitement homogène d'un rouge pâle, à grain fin.	Texture d'un rouge pâle à grains fins, parfaitement uniforme.	Pas de mention au cahier des charges.

TABLEAU II. — BARRES DE CUIVRE POUR ENTRETOISES

NORD	ÉTAT BELGE	CHEMINS DÉPARTEMENTAUX	OUEST[1]	MIDI[1]
Cuivre corocoro ne contenant pas plus de 0,004 de matières étrangères.	Cuivre première qualité. Densité 8,88. Ne devra contenir métaux étrangers ou oxydes dissous qu'à l'état de traces.	0,002 oxydule. 0,002 étain. 0,001 divers. maximum 0,005 matières étrangères.	0,004 matières étrangères mais pas plus de 0,0005 de soufre.	»
Pas mention au cahier des charges.	± 5 % sur le poids.	Calibrés à 0,1 près.	Sur diamètre ± 0mm,1. Ovalisation 0mm,1.	Sur diamètre ± 0mm,1.
R = 25^k All = 35 % Striction = 58 % $100\left(\frac{S-S'}{S}\right)$ sur éprouvettes de 100mm × 15mm de diam.	R = 24^k All = 24 % sur longueur = 200mm.	R = 22^k All = 36 % Striction = 60 % R + S = 82 sur éprouvettes découpées à froid de 100mm × 150mm² de section ou 70mm × 75mm² —	R = 24^k All = 25 % sur éprouvettes de L = 200 S = 600mm² ou $L = \sqrt{66,67\,S}$.	R = 24^k sur éprouvette de 100mm de long.
Fileté au pas des entretoises et plié à bloc sans crique.	Pas d'essai.	Bout de 150mm plié complètement.	Bout de 250mm de long plié complètement lorsque $e < 15^{mm}$, jusqu'à parallélisme des deux bouts avec diam. int. = e, lorsque $e > 15^{mm}$.	bout de 150mm plié complètement.
A chaque extrémité de chaque barre il est prélevé un bout de 5cm percé au centre d'un trou de 8mm et 30mm de profondeur qu'on agrandit jusqu'à 16mm à l'aide d'un poinçon conique.	Pas d'essai.	»	Pas d'essai.	»
Filetage présentant des filets parfaitement lisses sans aucune trace d'arrachement ou d'égrenement.	En deux passes. Filets parfaitement lisses sans aucune trace d'arrachement ou d'égrènement.	Sans arrachement ni défaut.	Pas d'essai.	»
Pas d'essai.	Pas d'essai.	»	Pas d'essai.	»
»	Cassure devant donner une texture d'un rouge rosé à grains fins.	»	Pas de mention au cahier des charges.	»

1. Pour l'Ouest et le Midi il s'agit de barres creuses tandis que pour les autres on entend des barres pleines.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU III. — CEINTURES EN CUIVRE

DÉSIGNATION.	BARRES POUR CEINTURES	CEINTURES ARTILLERIE
Métal	Cuivre ne contenant pas plus de 0,005 de matières étrangères.	Cuivre contenant au plus 0,004 matières étrangères.
Tolérances. . . .	Sur longueur ± 1mm,5. Sur épaisseur et sur largeur ± 0mm,2.	Indiquées dans des tables.
Essais de traction	»	R = 22k All = 35 %
Pliage	A bloc sans criques ni gerçures.	Ceintures rondes, pliage à bloc. — prismatique — fissures tolérées aux arêtes. — conique — jusqu'à contact du petit diamètre.
Retournement . .	»	Jusqu'à formation d'une boucle dont l'ouverture = 2 fois e.

TABLEAU IV. — BARRES DE LAITON

DÉSIGNATION	MARINE BARRES LAITON	MARINE BARRES MÉTAL NAVAL	ARTILLERIE BARRES LAITON A DÉCOLLETER
Métal.	Métal contenant 2 % de plomb et quelques millièmes d'étain.	Cu 62 % Zn 37 % Sn 1 %	Cu 60 à 62 Zn 37 à 40 Pb 1 à 1,5 matières étrangères < 0.2
Tolérances. . .	± 3,10.	— 0mm,5 sur diamètre. ± 5mm sur la longueur.	± 50mm sur la longueur. ± 0,2 / 0,0 sur le diamètre.
Essais de traction. . .	R = 30k All = 40 % avec compensation de 1 k. de R par 2 % d'allongement et vice versa sans descendre au-dessous de R = 28k All = 36 %. Essais sur éprouvettes de 100 L × 150mm² S.	R = 35k All = 10 %. Toutefois un déficit de 3 k. sur R peut être compensé par un excès d'allongement de 3 %.	»
Essais divers. .	On prend des bouts de barres dont la longueur sera égale à 20 fois le calibre ou l'épaisseur, et on les enroulera à froid en forme d'anneau circulaire, il ne devra se manifester dans ce travail ni pailles, ni fentes, ni gerçures ou autres défauts. On exécute sur quelques barres des soudures bout à bout.		*Essai de décapage.* Les barres sont plongées dans un bain alcalin à 100°, puis décapées à l'acide nitrique, elles sont ensuite exposées à l'air pendant une heure ou deux. Cette opération ne devra faire apparaître sur les barres ni criques, ni fentes, ni pailles.

TABLEAU V. — TRÉFILÉS DE CUIVRE ET DE LAITON

DÉSIGNATION	NORD F.L CUIVRE	NORD FIL LAITON	MIDI FIL LAITON	ARTILLERIE FIL CUIVRE	ARTILLERIE FIL LAITON	POSTES ET TÉLÉGRAPHES FIL CUIVRE ROUGE H. C. (Haute Conductibilité)
Métal. .	»	70/50	»	0,001 matières étrangères.	Cu 65 ± 1 / Zn 35 ± 1 — 1 % mat. étrangères	Cuivre H. C.
Essais de traction.	Fil de 15/10 — résistance par mm² moyen 45k, minima 40k — allongement moyen 2 %, minima 1 4mm 40 35 3 2 5 35 30 5 4 6 30 25 6 5 11 25 20 15 12	Moyenne : R = 45k, All = 15 % Minimum : R = 40k, All = 10 %	R = 30 à 50k	R = 22k All = 40 % Fil de moins de 2 mm. pas d'essai de traction.	»	Fil de 2mm — 2 1/2 — 3 — 3 1/2 — 4 — 4 1/2 — 5 Résistance par mm² 44,6 43,8 42,5 41,57 40,6 39,62 38,19 Allongement maximum 2 %.
Pliage. .	5 pliages.	5 pliages à 90°.	»	»	»	Fil de. . 2mm — 2 1/2 — 3 — 3 1/2 — 4 — 4 1/2 — 5 Nombre de pliages. . 6 — 5 — 7 — 6 — 5 — 4 — 4
Divers. .	»	»	»	»	Le fil enroulé sur un mandrin cylindrique de 15mm de diamètre, les spires se touchant, devra recevoir un mandrin de 18mm de diam. min. *Expérience pour fil de* 1mm,5. Pour le fil de 1mm, même épreuve mais sur mandrin de 10mm, porté à 12mm.	»
Essais de de résistance électrique	»	»	»	»	»	Fil de. . . 2mm — 2 1/2 — 3 — 3 1/2 — 4 — 4 1/2 — 5 Résistance électrique à 0° par kilomètre. ohms 5,3 — 3,39 — 2,56 — 1,73 — 1,55 — 1,05 — 0,85

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU VI. — PLANCHES DE CUIVRE

DÉSIGNATION.	P.-L.-M.	OUEST.	MIDI.	ÉTAT.	ORLÉANS.	NORD.	ÉTAT BELGE.	MARINE.	ARTILLERIE.
Métal . . .	Cuivre 1re qualité. Pas sensiblement d'oxydule. Traces métaux étrangers.	Cuivre 1re qualité. 0,004 métaux étrangers dont 0,0005 de soufre maximum.	»	Cuivre de 1re qualité, parfaitement pur. Métaux étrangers seulement à l'état de traces.	Tolérances { oxydule 0,002 ; étain . 0,002 ; divers . 0,001 } maximum : 0,005 de matières étrangères.	Cuivre corocoro. Les matières étrangères ne doivent pas dépasser 0,004.	Cuivre 1re qualité. Traces métaux étrangers.	0,01 matières étrangères.	0,004 matières étrangères.
Tolérances.	Il n'en est pas fait mention au cahier des charges.	Sur épaisseur { + 0,3 ; — 0,2	Sur épaisseur : + 15 % — 10 % pour e = de 1 à 2mm. ; + 10 % — 5 % pour e = de 3 à 6mm.	Pas mention au cahier des charges.	Sur épaisseur + 1/2 mm.	Pas mention au cahier des charges.	Sur poids (densité 8,88) ± 5 %	Sur longueur et largeur ± 1/40. Sur poids (densité) pour épaiss. 3mm ± 1/50 ; — < 3mm ± 1/20	Sur longueur : ± 2mm pour L ⩽ 2m ; 2mm par mètre L > 2m. Sur largeur ± 2mm. Sur épaisseur de 0mm,05 à 0mm,5 suivant e.
Essais par traction.	»	Sur pièces : non écrouies { R = 21k ; All = 50 % ; écrouies . . { R = 22k ; All = 25 % ; sur éprouvettes de L = 200 et S = 600 ou $L = \sqrt{66{,}67\,S}$.	»	R = 20k ; All = 22 % ; Élasticité = 8k par mm² sur éprouvettes de L = 200 env. S = 500 env.	R = 20k ; All = 38 % ; Striction = 50 %	R = 21k,5 ; All = 30 % sur éprouvette de 100mm. Aucun chiffre ne devra descendre au-dessous de 20k et 20 %.	»	»	R = 22k ; All = 38 % mesuré sur éprouvette de $L^2 = \frac{200}{3}\,S$. (Les feuilles de moins de 2mm épaiss. ne subissent pas d'essais.)
Pliage . . .	Pour e < 6mm pliage à bloc d'une bande après recuite. Pour e ⩾ 6mm pliage à angle droit après recuite.	Bande de 250mm L sur 40 l pour e < 5mm, pliée complètement, puis repliée sur elle-même ; pour e = de 5 à 15mm pliée complètement.	Bande de 50 à 60mm de large pliée complètement.	Bande de 50mm de large pliée complètement.	Bande de 150 L et 40mm larg. plié à froid sans clive.	Feuille de 250mm de long sur 35 à 40mm, pliage à bloc.	Pliage complet à froid et au rouge sombre.	Pliage à angle droit après recuit.	Pliage à bloc d'une feuille de 40mm de large sur 135.
Emboutissage	Calotte sphérique de D = 200 Flèche : 150mm lorsque e ⩽ 3mm ; 120mm — e > 3mm	Calotte hémisphérique de 200 D.	»	Calotte sphérique de D = 200 Flèche : 150mm lorsque e ⩽ 3mm ; 120mm — e > 3mm	En forme de calotte sphérique de 200 de D et 200 de flèche. (Épreuve faite seulement pour épaisseur < 5mm.)	»	»	Calotte sphérique de D = 200 Flèche : 150mm lorsque e ⩽ 2mm,5 ; 120mm — e = 3mm	Calotte sphérique D = 200 Flèche : 150mm lorsque e ⩽ 3mm ; 120mm — e > 3mm Pour épaisseur > 6mm emboutissage d'un manchon cylindrique à collerette.
Divers . . .	»	Essai lorsque e > 5mm. Un trou de 21mm de D sera porté à 40mm à l'aide d'un mandrin de 0,1 de conicité.	»	Pour les planches d'épaisseur < 4mm, confection de tuyaux droits et cintrés : de 0 à 1mm D du tube 0m,010 ; 1 à 2mm — 0m,060 ; 2 à 3mm — 0m,120 ; 3 à 4mm — 0m,200 Pour les planches d'épaisseur entre 4 et 8mm, confection de tuyaux coudés en coquille de D intér. = 0m35.	Un tube avec brasure par recouvrement sera confectionné et cintré à angle droit avec rayon de courbure intérieur égal à 2 fois son diamètre. Le diamètre du tube varie de 10 à 250mm.	Tuyaux soudés puis cintrés ayant pour les épaisseurs de 0 à 3mm 100mm de diam. ; 3 à 5mm 150mm — Cintrés à angle droit avec rayon intérieur = 2 fois D du tuyau pour les tubes de 150mm de diamètre. Les autres seront cintrés à 50e dans les mêmes conditions.	»	Confection d'un tube et cintrage du tube. D. du tube de 10, 60 et 120 suiv. épais. 1, 2, 3mm.	»

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU VII. — FOYERS EN CUIVRE

DÉSIGNATION	P.-L.-M.	EST	OUEST
Métal	Cuivre corocoro ou qualité équivalente. Pas sensiblement d'oxydule. Traces seulement métaux étrangers.	Cuivre 1re qualité. 0,003 matières étrangères.	0,004 matières étrangères, dont 0,0005 soufre.
Tolérances	Pas mention au cahier des charges.	Sur épaisseur : Pour plaques enveloppes et parois. $\begin{cases} +0^{mm},7 \\ -0^{mm},2 \end{cases}$ Pour plaques tubulaires et arrières. $\begin{cases} +1^{mm} \\ -0^{mm},5 \end{cases}$	Sur épaisseur $\begin{cases} +0^{mm},4 \\ -0^{mm} \end{cases}$
Essais de traction	R = moyenne 22^k pas moins de 20^k. All. = moyenne 28 % pas moins de 25 %. Sur éprouvettes de $\begin{cases} 200 \text{ longueur} \\ 500^{mm2} \text{ de sect.} \end{cases}$ ou $L^2 = 80\,S$	R = $\begin{cases} \text{minimum } 21^k,5. \\ \text{moyenne } 21^k,5. \\ \text{maximum } 23^k,5. \end{cases}$ All. = $\begin{cases} \text{minimum } 35\,\%. \\ \text{moyenne } 38\,\%. \end{cases}$ Striction $= 100\left(\frac{S-S'}{S}\right)$ S = section primitive. S′ = section réduite. Sur éprouvettes de $L = \sqrt{66,67\,S}$.	Pièces non écrouies. $\begin{cases} R = 21^k \\ All. = 30\,\% \end{cases}$ Pièces écrouies. $\begin{cases} R = 22^k \\ All. = 25\,\% \end{cases}$ sur éprouvettes de L = 200, S = 600 ou $L = \sqrt{66,67\,S}$, dont la largeur égale au moins 2 *e*.
Pliage	Bande de 30 sur 200 pliée à bloc à froid.	Bande de 40 sur 100 pliage à bloc après trempe.	Bande de 40 sur 150 pliée complètement lorsque $e < 15^{mm}$ pliée jusqu'à parallélisme des côtés et rayon int. = épaisseur lorsque $e < 15^{mm}$.
Élargissement	»	»	Bande de 200 sur 60 est percée d'un trou de 21^{mm} de diamètre que l'on porte à 40^{mm} à l'aide d'un mandrin de 0,1 de conicité.
Essais complémentaires	»	»	»

DÉSIGNATION	MIDI	ÉTAT	ORLÉANS	NORD
Métal	»	Cuivre ne contenant des métaux étrangers qu'à l'aide de traces. Qualité supérieure dite corocoro.	0,002 oxydule, 0,002 étain, 0,001 divers } maximum d'impuretés 0,005	Cuivre corocoro, la proportion de matières étrangères ne devra pas dépasser 0,004.
Tolérances	Sur épaisseur $\begin{cases} +6\,\% \text{ de } e \\ -3\,\% \text{ de } e \end{cases}$	Sur épaisseur $\begin{cases} +5\,\% \\ -2\,\% \end{cases}$	Sur épaisseur $\geqslant 25^{mm} + 1^{mm}$, — $< 25^{mm} + 0^{mm},5$.	Pas mention au cahier des charges.
Essais de traction	R = 20^k sur éprouvettes de dimensions convenables. All. = 30 % sur éprouvettes de $200^{mm} + 25^{mm}$.	R = 20^k All. = 30 % Élasticité = 8^k par mm^2 sur éprouvettes de L = 200 env. S = 500^{mm2} env.	R = 20^k All. = 38 % Striction = 50 % sur éprouvettes découpées à froid et recuites. Dimensions des éprouvettes variant suivant genre de plaques.	R = $21^k,5$ All. = 32 % Striction 45 % $\left(\frac{100\,(S-S')}{S}\right)$ sur éprouvettes de $20^{mm} + 100^{mm}$.
Pliage	Bande de 50 à 60 sur 150 au moins, pliage à froid jusqu'à parallélisme avec $d = 1\,1/2\,e$. Continué jusqu'à pliage à bloc en chauffant au rouge sombre.	Bande de 30^{mm} de largeur pliée à bloc.	Bande de 40 sur 150, pliée à froid sans choc.	Bande de 250×35 à 40^{mm}, pliage à bloc.
Élargissement	»	»	»	Rondelle de 75^{mm} de diamètre, percée d'un trou de 16^{mm} de diamètre agrandi jusqu'à 40^{mm}.
Essais complémentaires	»	»	Étirer des bandes au marteau en forme de pince. Le métal ne devra pas se criquer ou se fendre.	Étirage de quelques barrettes en forme de pince. Pratiquer une entaille au milieu des barrettes avec une tranche et les plier ensuite, le métal devra s'ouvrir sans éclater ni se rompre.

DÉSIGNATION	ÉTAT BELGE	DÉPARTEMENTAUX	WINTERTHUR
Métal	Densité, 8,88 Métaux étrangers et oxydes dissous seulement à l'état de traces.	0,002 oxydule, 0,002 étain, 0,001 divers } maximum d'impuretés 0,005	»
Tolérances	Sur le poids ± 5 %.	»	»
Essais de traction	R = 22^k par mm^2 All. = 35 % sur éprouvettes de 200 longueur, épaisseur de la planche, largeur = 2 *e*	R = 20^k All. = 38 % Striction 50 % R + S = 70 sur éprouvettes variant suivant genre des plaques.	R = 22^k All. = 35 % R + All. = 770 sur éprouvettes de 200^{mm}
Pliage	Pliage jusqu'à parallélisme des côtés avec diamètre d'ouverture $= \frac{1}{2}\,e$. Essai à froid et au rouge sombre.	Bande de 150×40, pliage à bloc et à froid.	Pliage à bloc et à froid.
Élargissement	»	»	»
Essais complémentaires	»	Bandes amincies en forme de pince.	»

DÉSIGNATION	PORTUGAIS	MADRID-CACÉRÈS	ORIENTAUX	NORD DE L'ESPAGNE
Métal	Cuivre corocoro ne contenant des métaux étrangers qu'à l'état de traces.	Cuivre ne contenant des métaux étrangers qu'à l'état de traces.	»	Cuivre corocoro ou qualité équivalente. Même que P.-L.-M.
Tolérances	»	»	»	Même que P.-L.-M.
Essais de traction	R = 22^k pas moins de 20^k, All. = 30 % pas moins de 30 % sur éprouvettes de 30×200^{mm}	R = 22^k All. = 22 % sur éprouvettes de 200 de long et d'une largeur = 2 *e*	R = 22^k All. = 38 % ou R + All. = 60.	Même que P.-L.-M.
Pliage	Bande de $30^{mm} \times 250$, pliage à bloc et à froid.	Bande de 40×150, pliage à froid à bloc.	»	Même que P.-L.-M.
Élargissement	»	»	»	»
Essais complémentaires	Bandes amincies en forme de pince. Entaille à la tranche et pliage devant s'ouvrir progressivement sans éclater ou se rompre.	Bandes amincies en forme de pince. Entaille à la tranche et pliage devant s'ouvrir progressivement sans éclater ni se rompre.	»	»

TABLEAU VII. — FOYERS EN CUIVRE

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU VIII. — PLANCHES DE LAITON

DÉSIGNATION.	P.-L.-M.	ÉTAT.	NORD.	ÉTAT BELGE.	MARINE.	ARTILLERIE.
Métal	1er titre : 70 Cu ± 1 % de l'alliage 30 Zn ± 1 % — métaux étrangers 0,5 % Les autres titres sont : 67/33, 65/35, 63/37.	70 Cu ± 1 % 30 Zn ± 1 %	70 Cu 30 Zn 3 % de matières étrangères.	»	70 Cu } 0,01 30 Zn } matières étrangères.	65 Cu ± 1 } 0,01 35 Cu ± 1 } matières étrang.
Tolérances	Pas mention au cahier des charges.	Pas mention au cahier des charges.	Pas de cahier des charges.	»	Sur longueur et largeur ± 1/40e Sur poids lorsque $e \leqslant 3^{mm}$ + 1/30e — $e > 2^{mm}$ + 1/20e	Sur longueur : ± 2mm pour L ⩽ 2m 2mm par mètre L > 2m Sur largeur : ± 2mm Sur épaisseur : de 0mm,05 à 0mm,5 suivant *e*.
Essais par traction	Pas d'essai.	Pas d'essai.	R = moyenne 30k, pas moins de 25k. Al = moyenne 40 %, pas moins de 30 %; sur éprouvettes non recuites de 30mm de largeur à l'épaisseur de la planche L = 100mm.	»	Pas d'essai.	Pas d'essai.
Pliage	Pas d'essai.	Pas d'essai.	Bande de 40 à 50 de large et 250 L env. non recuite, pliée complètement.	Pliage complet d'une bande.	Pas d'essai.	Pas d'essai.
Emboutissage	Calotte sphérique de 100mm de rayon et 120 de flèche.	Calotte sphérique de 100mm de rayon et 120 de flèche.	Calotte sphérique à bord plat circulaire de 30mm de larg., corde 200mm, flèche 12,mm.	»	Calotte sphérique de 200 D, flèche 80mm pour *e* de 3 à 5mm.	Calotte sphérique de 200 D flèche de 120.
Divers	»	»		»	Tube de 1, 5, 9 cm de D, formé avec planches de 1, 2. 3 mm. d'épaisseur.	»
Observations	»	»	»	»	Le poids des planches est calculé à raison de 8k,446 (1) par m² de surface et par mm. d'épaisseur.	»

1. Cette densité est trop faible, car elle est égale en réalité à environ 8,7.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU IX. — LAITON DE GUERRE

DÉSIGNATION	DOUBLAGES LAITON MARINE	FLANS EN LAITON RUELLE (*Marine*)	FLANS EN LAITON PUTEAUX (*Guerre*)	BANDES LAITON MINISTÈRE DE LA GUERRE
Métal	70 % de cuivre, 30 % de zinc.	67 % de cuivre, 33 % de zinc.	67 % de cuivre, 33 % de zinc, avec obligation d'employer des marques désignées et limite des déchets devant provenir de la guerre à 40 %.	67 % de cuivre, 33 % de zinc, avec obligation d'employer des marques admises. Déchets provenant de la guerre avec maximum de 40 % de l'alliage. Pas plus de 0,45 % de matières étrangères.
Tolérances	± 5 % sur le poids de chaque feuille.	2/10 en + sur épaisseur. Diamètres ⩽ 300 + 1mm, Diamètres > 300 ± 1mm.	Diamètre + 0mm,5 / − 0 Épaisseur + 0mm,2 / − 0	Épaisseur de 3,95 à 4mm, sur la largeur 1mm, la longueur sera supérieure à 1m,30.
Essais de traction	»	L'artillerie de marine prend comme minimum : R = 30k par mm² All = 58 %. A Ruelle les essais de traction ne sont faits qu'à titre de renseignements et ne viennent qu'en 2e ligne après l'emboutissage.	R = 30,6 All = 62 % 15 R + 6 A ⩾ 855 sur éprouvette de 100 long.	R = 30,6 All = 57 % 15 R + 6 A ⩾ 812 sur longueur = 100mm.
Divers	Les feuilles à expérimenter seront en partie décapées à l'acide nitrique. Une autre partie sera frottée à la pierre ponce. Les surfaces examinées à la loupe ne doivent pas présenter de pailles, gerçures ou cendrures. Les feuilles doivent s'appliquer exactement sur une surface plane.	Après emboutissage il ne doit pas y avoir plus de 3 % de rebut. Au-dessus de ce chiffre le rebut du lot peut être prononcé. On peut admettre jusqu'à 10 % de rebut en faisant remplacer par le fournisseur les flans mauvais.	La fabrication est surveillée par des agents.	La plaque coulée aura au moins 20mm d'épaisseur. Pour obtenir la bande on donnera au moins 3 laminages. Le poids de la masselotte sera au moins le cinquième du poids total de la plaque.

TABLEAU X. — TUYAUX EN CUIVRE SOUDÉS

MARINE

MÉTAL	TOLÉRANCES	ESSAI DE PRESSION	COLLERETTE	CINTRAGE
Cuivre = 9 de densité, 0,004 matières étrangères.	Sur longueur + 1cm, Sur D. int. ± 1/2mm pour 50mm et — ± 1mm — 50 à 200mm ± 2mm — > 200, Sur épaisseur ± 0,1, Sur épaisseur moyenne calculée par pesée, ± 0,2	$P = 800 \frac{E}{D}$	L = 0,6 du diamètre extérieur sans dépasser 30mm. Le rayon de courbure raccordant la collerette et le tube ne dépassera pas l'épaisseur du tube. La collerette sera faite à la presse hydraulique ou au marteau pilon mais non à la main.	A 90° avec rayon = 4 fois diamètre extérieur la soudure ayant la même courbure que l'axe.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU XI. — TUBES EN CUIVRE SANS SOUDURE

DÉSIGNATION.	P.-L.-M.	EST.	OUEST.	MIDI.	ORLÉANS.	ÉTAT BELGE.	MARINE.
Métal	Traces métaux étrangers. Pas sensiblement d'oxydule. Cuivre 1re qualité.	Cuivre 1re qualité. 0,005 matières étrangères.	Cuivre 1re qualité. Mat. étrangères 0,004 dont 0,0003 soufre.	Cuivre de 1re qualité.	0,002 oxydule, 0,002 étain, 0,001 divers } max. 0,005.	Cuivre 1re qualité. Densité 8,88.	Cuivre = 9 de densité, 0,004 matières étrangères.
Tolérances	Sur épaisseur ± 10 % mais pas > 0mm,3	Sur épaisseur ± 5 % — long. + 1mm par m. Ovalisation ± 0,5.	Sur diam. extér. ± 0mm,5 Sur épaisseur + 0mm,2	Sur diamètre ± 0mm,5. — épaisseur + 0mm,2.	Sur épaisseur + 0mm,2 Sur diamètre ± 0mm,5	Sur poids 5 %.	Sur longueur + 1cm. D int. ± 1/2mm pour 50mm et moins. ± 1mm — 50 à 200mm ± 2mm — > 200 Sur épaisseur ± 0,1. Sur épaisseur moyenne calculée par pesée ± 1/20e.
Essais de traction	»	»	»	R = 27k sur éprouvette prise dans le sens de la longueur du tube.	R = 25k All = 27 % Striction = 50 à 55 % sur éprouvettes non recuites obtenues en développant à froid des bouts de tuyaux sciés suiv. une génératrice.	»	Sur éprouvettes recuites non recuites Élasticité . . . . . 4 15 Rupture . . . . . 21 24 Allong. . . . . 38 % 22 % Il est accordé une tolérance de 1k sur la charge de rupture compensée par 2 % d'allongement ou le contraire.
Essai de pression	$P = 800 \times \frac{E}{D}$ mais pas plus de 20k par cm².	20k par cm² pendant 1 minute.	20k par cm².	»	20k par cm².	$P = 770 \frac{E}{D}$ int. pendant 1 minute.	Éclatement calculé par $R = \frac{PD}{2E}$ pas moins de 15k par mm². Déformation — 3k par mm². Pression en k par cm² $= 1100 \frac{E \text{ en mm}}{D \text{ en mm}}$
Collerette	Collerette de 15mm de largeur rabattue à froid.	Collerette de 15mm. Congé intérieur de raccordement égal 1 fois l'épaisseur du tuyau.	Collerette de 12 à 15mm.	Diamètre extérieur de la collerette égal diamètre intérieur du tube augmenté de 50 %.	Collerette de 15mm de largeur rabattue après recuit.	»	Largeur = 1/6e du D ext. sans dépasser 30mm. Congé avec rayon de courbure égal à l'épaisseur du métal.
Cintrage	Tube cintré jusqu'à rayon de courbure égal 2 fois diam. ext.	Même que P.-L.-M.	Même que P.-L.-M.	»	Même que P.-L.-M.	Même que P.-L.-M.	Même que P.-L.-M.
Retournement	Bout de tube de 100mm et scié suivant une génératrice sera retourné complètement.	»	Retournement d'un bout de tube de 100mm de long.	»	Retournement d'un bout de tube de 100mm de long.	»	Retournement d'un bout de tube de 100mm de long.
Aplatissement	Deux essais de pliage à bloc : l'un à froid ; l'autre à chaud.	»	»	»	»	Aplatissement complet à froid sur une longueur de 5 à 10cm.	Deux essais d'aplatissement : l'un à froid après recuit ; l'autre à chaud (rouge cerise naissant) en une seule chaude.
Évasement	Évasement jusqu'à formation d'une collerette de 40° d'inclinaison sur l'horiz. et de 20mm de long. L'essai est fait au rouge cerise.	»	»	»	»	»	»

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLEAU XII. — TUBES EN LAITON SANS SOUDURE

DÉSIGNATION	P.-L.-M. TUBES POUR FUMÉE	ÉTAT TUBES POUR FUMÉE	ÉTAT BELGE TUBES DE FUMÉE	MARINE POUR CONDENSEURS	MARINE POUR CHAUDIÈRES
Métal	Tolérance dans la proportion des métaux prévue est de : 70 Cu { 1 % du poids 30 Zn { de l'alliage. Métaux étrangers : 0,5 % de l'alliage.	70 Cu ± 1 %, 30 Zn ± 1 %.	70 cuivre 30 zinc. Tolérances de 2 % en plus ou en moins.	70 % de cuivre au moins, pas plus de 0,007 de plomb.	Minimum 68 % de cuivre, pas plus de 0,007 de plomb.
Tolérances	»	Aucune sur dimensions 3 % sur poids.	Sur diam. : 0,01 du diam. Sur épais. : 0,1 de épais.	Sur L = ± 1mm Sur D. ext. — 0mm,2 Sur e ± 0mm,1 Sur poids { + 1/15e { — 1/30e (calculé avec 8,5 densité).	Sur L = + 2mm, Sur D ext. — 1/4mm Sur e ± 1/5mm Sur poids 1/20e (densité = 8,5).
Essai de traction (*Rupture à la pression hydraulique*).	»	»	»	20k par mm².	24k par mm².
Essai de pression	20k par cm², pendant une minute.	20k par cm² pendant 1 minute.	8 atmosphères.	10k par cm².	30k par cm².
Rabattement de collerette	A froid de 15mm de large.	De 15mm de large.	»	Largeur = 1/10e du diamètre.	Largeur = 1/10e de diamètre.
Retournement	Un bout de 200mm de long est scié suivant une génératrice et retourné complètement.	Retournement d'un bout de 100mm.	»	»	»
Renflement	»	»	Mandrinage à froid après recuit jusqu'à augmentation du diamètre de 10 %.	Renflement à un diamètre supérieur de 1/10e de celui du tube et sur une longueur = 1 f. 1/2 le diam.	Renflement à un diamètre supérieur de 1/10e de celui du tube et sur une longueur = 1 f. 1/2 le diam.
Cintrage	Bout de 700mm recuit et rempli de brai est plié jusqu'à ce que les extrémités se rejoignent.	Bout de 700mm recuit et rempli de brai est plié à froid complètement.	»	»	»
Flexion	Un bout de 700mm non recuit rempli de brai et placé entre 2 appuis distants de 500mm est pressé à son milieu jusqu'à une flèche de 80mm,	Un bout de 700mm non recuit rempli de brai et placé entre 2 appuis distants de 500mm est pressé à son milieu jusqu'à une flèche de 80mm.	»	»	»

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

XV

RÉSULTATS

DES

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES SUR LES PONTS MÉTALLIQUES

COMMUNICATION

Présentée par M. LANNA.

EXPOSÉ

La Compagnie d'Orléans a fait exécuter, pendant le cours des années 1897, 1898, 1899, un grand nombre d'expériences en vue de rechercher le parti à prendre pour les ouvrages métalliques de son réseau, que le calcul ordinaire condamnait et qui, néanmoins, se comportaient très bien en service.

Les expériences ont démontré que les ouvrages en question sont, en général, plus solides que ne l'indique le calcul ordinaire, puisque, pour 42 % d'entre eux, on a constaté qu'il n'existait *aucun dépassement* par rapport aux limites fixées pour les ouvrages neufs par le règlement ministériel du 29 août 1891.

Les mesures des déformations ont été faites à l'aide des appareils imaginés ou perfectionnés par M. Rabut et décrits par cet ingénieur dans les *Annales des Ponts et Chaussées* du mois d'octobre 1896.

Nous nous proposons de faire connaître, dans cette note, le résumé succinct des résultats auxquels nous ont conduit ces diverses mesures.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1° PETITS OUVRAGES

Nous rangeons dans cette catégorie les ouvrages d'une portée inférieure à 10 mètres. Ils sont compris dans les quatre types ci-dessous :

a. Ouvrages comportant des poutres jumelles symétriques à longrines intérieures (fig. 1).

b. Ouvrages comportant des poutres caissons à longrines intérieures (fig. 2).

c. Ouvrages avec poutres symétriques à longrine supérieure (fig. 3).

d. Ouvrages avec poutres symétriques, pièces de pont et longerons.

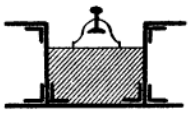


Fig. 1.

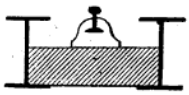


Fig. 2.

Fig. 3.

Lorsque la voie est à double champignon, les charges concentrées se transmettent par l'intermédiaire des coussinets, et on a obtenu une réduction notable de la valeur du moment fléchissant maximum maximorum en plaçant les coussinets à $0^m,40$ de chaque côté de l'axe de la travée jusqu'à une ouverture de $4^m,80$. Au-dessus de cette ouverture, il y a avantage à placer un coussinet au milieu de la portée.

Enfin, pour diminuer l'effet des chocs, on a partout supprimé les joints de rails sur les petits tabliers; M. Rabut estime que l'exécution de cette mesure équivaut, au point de vue de la stabilité, à une réduction du poids des essieux qui serait de plus d'un quart pour les vitesses moyennes et de plus d'un tiers pour les grandes vitesses. Les résultats de nos expériences sont d'accord avec ces conclusions.

Nos expériences nous ont permis de vérifier que les petits ouvrages sont partiellement encastrés sur les culées lorsque les conditions suivantes sont remplies :

1° Absence de joint de rail sur l'ouvrage;

2° Longrine en bois d'un seul morceau, en bon état d'entretien et dépassant l'about des poutres;

3° Longue base d'appui des poutres sur les culées.

Ce fait important nous a été révélé par le sens du travail de la poutre près des appuis, qui est une compression sur la table inférieure.

Il résulte de cette circonstance une réduction considérable du travail calculé; ainsi, par exemple, nous avons trouvé des réductions de moitié sur le travail théorique pour des ouvrages du type à poutres symétriques avec longrines supérieures, situés sur la ligne de Tours au Mans.

Une autre cause de réduction du travail provient du secours que les poutres de rive apportent aux poutres principales lorsqu'elles sont solidement reliées à ces dernières.

EXEMPLE. — Sur la ligne de Lexos à Toulouse, pour un ouvrage de 5 mètres d'ouverture à poutres caisson, nous avons trouvé un travail de $3^{kg},50$ à la semelle inférieure de l'une des poutres de rive, alors que la semelle inférieure de la poutre à caisson voisine accusait un travail de $4^{kg},31$ pour la même position de la surcharge.

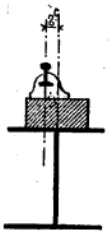


Fig. 4.

Nous avons souvent constaté que les points d'une section situés à la même distance et du même côté de l'axe neutre accusaient des différences de travail très notables. Ceci est dû parfois à des vices de construction qui font que l'axe du rail ne coïncide pas à l'axe de l'âme des poutres; un faible déport de 1 à 2 centimètres suffit pour produire l'effet que nous signalons (fig. 4).

M. Rabut a vérifié qu'un calage inégal sur les appuis des deux ailes d'une même poutre produit un résultat analogue.

Dans les poutres caissons, la charge, supportée par la longrine, tend à fléchir le fond du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

caisson entre les semelles d'appui et à leur donner la forme indiquée fig. 5 ; il en résulte que la semelle supérieure est surchargée sur l'arête extérieure et déchargée sur l'arête intérieure.

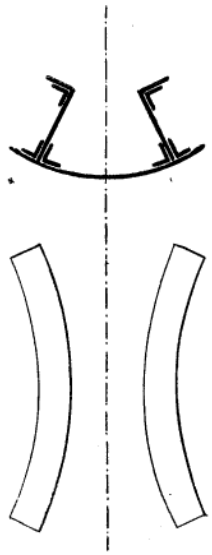


Fig. 5.

En employant un platelage en tôle plate, solidement rivée aux poutres principales et munie de couvre-joints solides aux solutions de continuité, on peut réduire notablement les efforts secondaires que nous venons de signaler. C'est la solution que nous préconisons pour les ouvrages neufs.

Tous les résultats que nous venons de rapporter ont été trouvés avant nous par M. Rabut dans les expériences qu'il a faites sur les ouvrages métalliques de la Compagnie de l'Ouest.

Nos expériences n'ont fait que confirmer l'exactitude des siennes.

2° GRANDS OUVRAGES

A. — POUTRES PRINCIPALES.

Ouvrages non contreventés à la partie supérieure. — Lorsque la voie est placée à la partie inférieure des poutres et que l'ouvrage n'est pas contreventé en haut, nous avons toujours constaté une différence de travail dans la plate-bande supérieure, au milieu de l'ouvrage, sous la charge qui produit le moment fléchissant maximum, du côté intérieur et du côté extérieur.

L'appareil 1, situé du côté extérieur, a toujours accusé un travail plus grand que l'appareil 2, situé du côté intérieur (fig. 6).

Ceci s'explique facilement :

Sous l'action des charges, la pièce de pont fléchit; il se produit une rotation en D et le montant s'incline vers l'intérieur du pont.

Si toutes les entretoises étaient également chargées, la plate-bande supérieure tendrait à se rapprocher uniformément du milieu; seul, le montant vertical extrême opposerait une résistance, parce qu'il est appuyé à la base et qu'il ne peut pas s'incliner.

Les plate-bandes supérieures tendent donc à prendre une courbure en restant presque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

immobiles au droit des appuis extrêmes et s'infléchissant vers le milieu, entraînées par la rotation des entretoises.

Nous avons vérifié que la différence des coefficients du travail sur les deux bords est, en général, très notable dans certains ouvrages anciennement construits; le rapport de ces coefficients peut descendre jusqu'à 0,62.

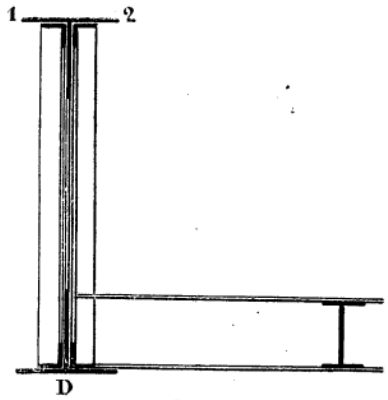


Fig. 6.

Ceci montre bien l'utilité de montants verticaux extrêmes très rigides pour s'opposer à cette déformation dans les ponts qui ne sont pas contreventés à la partie supérieure.

Dans les tabliers à voie inférieure, nous avons constaté que la semelle inférieure travaille moins que la semelle supérieure; M. l'inspecteur général Dupuy a expliqué, le premier, ce fait, en faisant remarquer que les longerons prennent une partie des efforts qui s'exercent sur les plate-bandes et les soulagent.

Il résulte des explications qui précèdent que, dans les ouvrages métalliques à voie inférieure non contreventés en haut, c'est-à-dire en général pour les ouvrages d'une ouverture inférieure à 40 mètres, le travail maximum des poutres principales se produit sur le côté extérieur des semelles supérieures et vers le milieu de l'ouvrage.

Ouvrages contreventés à la partie supérieure. — Dans les ouvrages contreventés en haut, les semelles supérieures des poutres principales ne se déversent pas vers l'intérieur sous l'action de la surcharge; mais si la voie est posée à la partie inférieure, les semelles inférieures travaillent moins que les semelles supérieures, comme dans le cas précédent, parce que le pancher constitue un épanouissement de la semelle inférieure.

Ainsi, par exemple, au grand viaduc de Sully-sur-Loire, composé de 7 travées solidaires de 60 mètres d'ouverture avec voie inférieure, le travail des membrures inférieures, sous la charge qui produit le moment fléchissant maximum, est de $5^{kg},67$, alors que le travail des membrures supérieures, sous la même charge et dans la même section, est de $6^{kg},96$.

B. — PIÈCES DE PONT ET LONGERONS.

Pièces de pont. — Toutes les expériences que nous avons faites tendent à démontrer que les pièces de pont ne sont jamais encastrées à leurs extrémités, car chaque fois que nous

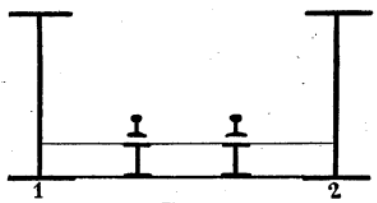


Fig. 7.

avons posé des appareils de mesure aux extrémités 1 et 2 de ces pièces, ces appareils ont toujours accusé nettement une extension (fig. 7).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sous l'action des charges, les pièces de pont éprouvent une torsion qui les incline du côté des longerons les plus chargés.

Nous pensons que le calcul de ces pièces doit toujours être fait en les supposant simplement posées, et en admettant comme portée la distance d'axe en axe des poutres principales.

Longerons. — Ces pièces ne sont encastrées que lorsque les charges sont symétriques de part et d'autre de l'entretoise; mais, dans ce cas, la rivure travaille beaucoup et il est nécessaire de la calculer en vue de cet effet. D'autre part, l'allongement des membrures est transmis aux longerons par les pièces de pont, d'où résulte la dislocation fréquente des assemblages entre les longerons et les pièces de pont.

Lorsque la voie n'est pas posée exactement dans l'axe de l'âme des longerons, on trouve des écarts considérables entre les chiffres qui expriment le travail des deux bords d'une même semelle, lorsque les longerons offrent une faible résistance à la torsion.

Ainsi au viaduc sur la Creuse, sur la ligne de Busseau-d'Ahun à Felletin, pour un déport de la voie de 0,02, on a trouvé les résultats suivants (fig. 8) :

Appareil n° 1. Extension : $9^{kg},50$.

Appareil n° 2. Extension : $3^{kg},00$.

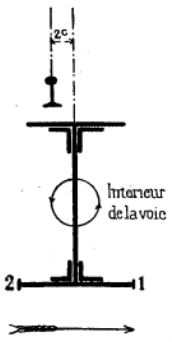


Fig. 8.

M. Rabut fait remarquer que cette anomalie implique l'existence dans la table inférieure du longeron d'une flèche horizontale dans le sens 2-1, qui a pour effet d'augmenter l'extension de l'aile 1 et de diminuer celle de l'aile 2. Le déport du rail a produit une torsion dans le sens indiqué par les flèches.

Ces résultats montrent que la pose des longerons et de la voie sur les ouvrages métalliques doit être faite avec une précision en quelque sorte mathématique. Dans les ponts en courbe, où le déport du rail est inévitable, la forme en caisson serait avantageuse pour les longerons, elle aurait pour résultat de réduire la torsion.

Ces inconvénients ne se produisent pas avec la pose sur traverses et ballast qui évite les effets du desaxement.

C. — TREILLIS.

Pour déterminer le travail dans les barres de treillis, nous avons adopté la méthode indiquée par M. Dupuy, inspecteur général des Ponts et Chaussées, dans le numéro de septembre 1896 des *Annales des Ponts et Chaussées*.

Considérons la partie d'une barre comprise entre deux nœuds A et B; nous plaçons trois appareils 1, 2, 3 aussi près que possible du point A et trois appareils 4, 5, 6 aussi près que possible du point B, de manière à avoir le travail dans deux sections correspondant au

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

milieu des appareils, et l'on s'arrange pour avoir entre les deux sections une distance de 80 centimètres ou 1 mètre, ou plus si l'ouvrage le permet (fig. 9).

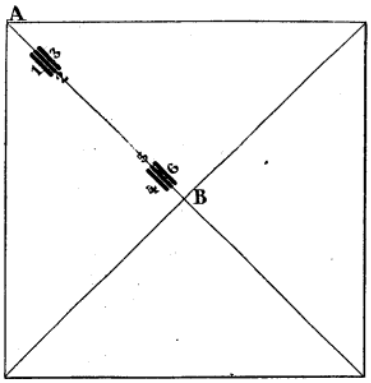


Fig. 9.

M. Dupuy a expliqué, dans l'article des *Annales* rappelé plus haut, comment, à l'aide de 3 Manuels, on détermine le travail du métal en un point quelconque d'une section, le travail moyen, le travail maximum et le travail minimum.

Nous renvoyons, pour cette démonstration, à l'article de M. Dupuy. Le principe de cette méthode s'applique, non seulement aux barres de treillis, mais encore à toutes les pièces, quelle que soit leur section. (Formules générales données dans le mémoire de M. Rabut, *Annales des Ponts et Chaussées*, octobre 1896.) Elle suppose l'exactitude de la loi de Navier.

Supposons qu'il s'agisse d'une barre en forme de ⊥ :

Soit R_1 le travail moyen au centre de gravité G de la 1re section (1, 2, 3) (fig. 10);
R_A le travail dans la fibre A;
R_B le travail dans la fibre B;
R_C le travail dans la fibre C;
I_1 le moment d'inertie par rapport à Gx;
I_2 le moment d'inertie par rapport à Gy;
Soit $BC = 2a$ et n la distance du point A au centre de gravité de la section.

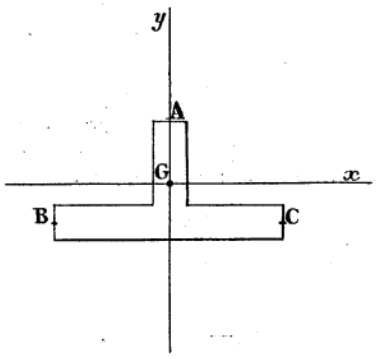


Fig. 10.

Nous aurons :

$$R_A - R_1 = \mu_1 \frac{n}{I_1} \qquad \mu_1 = (R_A - R_1)\frac{I_1}{n}$$

d'où

$$R_B - R_1 = \mu_2 \frac{a}{I_2} \qquad \mu_2 = (R_B - R_1)\frac{I_2}{a}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On aurait de même pour la deuxième section :

$$\mu'_1 = (R'_A - R'_1)\frac{I_1}{n}$$

$$\mu'_2 = (R'_B - R'_1)\frac{I_2}{a}$$

R'_1 devra être, à très peu près, égal à R_1 ; l'égalité devrait même être absolue s'il n'y avait pas d'erreur dans les observations et si la loi de Navier était rigoureuse, ce que l'on vérifie en faisant quatre mesures au lieu de trois quand on peut.

Connaissant μ_1 et μ'_1, on aura :

$$\mu'_1 = \mu_1 + t_1 d$$

en appelant d la distance entre les milieux des deux groupes d'appareils, et

$$\mu'_2 = \mu_2 + t_2 d.$$

Ces relations permettent de déterminer t_1 et t_2, et l'on aura ainsi la possibilité d'obtenir les moments de flexion en un point quelconque de la barre au-dessus du nœud central et, par suite, le travail en un point quelconque de la barre et en particulier dans la rivure d'attache.

Les expériences nous ont permis de constater que les actions qui naissent de la déformation des treillis sont très complexes ; il se produit d'abord des efforts qui tendent à allonger ou à raccourcir les barres ; il se produit ensuite des moments de flexion dus à ce que les barres ne sont pas sollicitées suivant leur axe neutre.

Comme les barres tendues et comprimées AO, BO sont solidaires au milieu O et que la barre comprimée fléchit beaucoup plus que la barre tendue, il se produit un effort qui tend à accroître la flexion de la barre tendue et à diminuer la flexion de la barre comprimée.

Enfin les barres, dans un triangle, changent de longueur ; la barre OA s'allonge, la barre OB se raccourcit, et comme AB se raccourcit également et que les angles restent invariables, il faut que les barres OA et OB fléchissent (fig. 11).

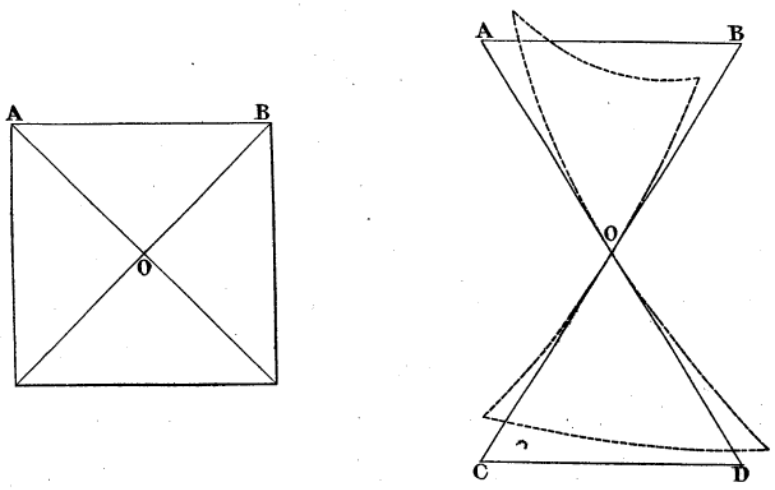


Fig. 11.

L'inverse se produit pour les barres OC et OD.

C'est d'ailleurs toujours près des attaches que nous avons trouvé les efforts maxima.

C'est donc en ces points qu'il convient de placer les appareils de mesure du travail.

Les moments qui naissent de la déformation des barres des treillis peuvent donner lieu, pour certaines fibres, à des efforts très supérieurs au travail moyen et même quelquefois de signe contraire au travail moyen, c'est-à-dire à celui que supporte l'axe neutre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. Dupuy, Inspecteur général des Ponts et Chaussées, a signalé tous ces faits dans le numéro des *Annales* précité : nos expériences n'ont fait qu'en confirmer l'exactitude.

On peut réduire les flexions des barres des treillis en adoptant des barres symétriques ou bien, si le tablier est placé à la partie inférieure, en plaçant à l'intérieur les barres tendues et à l'extérieur les barres comprimées.

D. — CONTREVENTEMENT.

Les expériences récentes que nous avons faites au pont de Puy-l'Évêque sur le Lot et au pont de Sully sur la Loire, nous permettent d'affirmer que les contreventements horizontaux participent au travail des poutres principales et que la déformation maxima de ces pièces se produit sous l'action des surcharges accidentelles.

Il serait donc fort utile dans les projets d'ouvrages métalliques de calculer les barres de contreventements et leur rivure d'attache en tenant compte de l'effet des surcharges. Ce calcul ne présente aucune difficulté ; M. Dupuy l'a donné dans le numéro des *Annales des Ponts et Chaussées* de janvier 1895.

Si les attaches des contreventements horizontaux périclitent si souvent dans les ouvrages métalliques cela tient, selon nous, à ce qu'on ne tient jamais compte de l'effet des surcharges dans le calcul des rivets d'attache.

E. — PONTS SYSTÈME MESNAGER.

Nous avons eu l'occasion au cours de cette note de faire remarquer l'importance des efforts secondaires qui, dans le système ordinairement employé pour la construction des ponts métalliques, se produisent notamment aux abords des nœuds rigides. Les expériences faites sur les grands ponts construits en 1893 sur les lignes de Bourges à Cosne et de Bourges à Gien, ont montré que les actions secondaires dues à la rigidité des pièces et des assemblages qui les unissent peuvent plus que doubler le travail calculé.

Si l'on veut tenir compte de ces actions on est entraîné dans des calculs très longs et très compliqués qu'on évite, dans la pratique, en adoptant de forts coefficients de sécurité. M. Mesnager a indiqué le moyen de supprimer ces efforts secondaires en modifiant le système d'attache des éléments des ponts et en réalisant des liaisons à la fois rivées et flexibles qui réunissent les avantages de l'articulation américaine à la solidité des assemblages rivés employés jusqu'à ce jour en France.

Description sommaire du système Mesnager. — M. Mesnager remarque tout d'abord que, dans les constructions métalliques, l'angle dont une pièce peut tourner par rapport à celles auxquelles elle est reliée ne dépasse pas 0,001 à 0,002 en unités trigonométriques.

Ceci posé la disposition admise consiste à joindre deux pièces d'une construction métallique par une ou deux lames métalliques, suivant les cas, à sections rectangulaires, suffisamment minces pour n'offrir qu'une résistance insignifiante à la flexion transversale dans les limites de variations d'angle indiquées ci-dessus et cependant assez épaisses relativement à leur longueur pour résister à la compression sans flamber. Par des expériences faites à l'École des Ponts et Chaussées sur un panneau de grandeur naturelle, M. Mesnager a vérifié qu'en donnant aux lames flexibles une longueur égale au maximum à dix fois leur épaisseur on peut être sûr qu'elles résisteront sans flamber à un effort minimum de 19 kilogrammes par millimètre carré de leur section transversale.

On trouvera tout au long les détails de construction du système Mesnager dans le numéro des *Annales* du 26 décembre 1896.

Nous n'avons voulu ici qu'indiquer le principe du système.

Avantage du système Mesnager. — Si les règlements relatifs aux ouvrages métalliques fixent des limites assez faibles pour le travail des pièces composant ces ouvrages, c'est parce que les méthodes de calcul ordinaires, qui ne tiennent pas compte des efforts secondaires conduisent à des résultats notablement inférieurs à la vérité. Si l'on savait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

calculer exactement les ouvrages métalliques on pourrait sans danger faire travailler une barre à 12 et même 14 kilogrammes si sa limite d'élasticité correspondait à 16 ou 18 kilogrammes. Le système Mesnager supprimant la presque totalité des efforts secondaires, un ouvrage construit dans ce système travaillerait dans les conditions indiquées par le calcul ordinaire.

Par conséquent dans les ouvrages de ce type on pourrait adopter des coefficients de sécurité beaucoup plus élevés et faire ainsi une économie très considérable de métal.

La Compagnie d'Orléans a fait construire tout récemment un pont de ce système pour la traversée du Beuvron sur la ligne de Saint-Aignan à Blois; l'ouvrage a une portée de 40 mètres.

Les expériences faites sur l'ouvrage et dont le compte rendu se trouve dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, 2e trimestre 1899, ont pleinement confirmé les prévisions des auteurs du projet. Nous rappellerons ici les conclusions du procès-verbal d'épreuves; ces conclusions sont les suivantes :

Il résulte des expériences :

1° « Que le travail observé est toujours de même signe que le travail calculé;

2° « Que les coefficients de travail observés sont tout à fait comparables à ceux du travail calculé.

« Ces résultats n'ont jamais été atteints dans les expériences antérieures faites sur les ponts rivés du système ordinaire; il semble donc que le système Mesnager fait disparaître la presque totalité des efforts secondaires. »

Dans une note qu'il a bien voulu nous communiquer, M. l'Inspecteur général Dupuy calcule de la façon suivante le travail des lames flexibles.

Soit AB une barre encastrée à ses deux extrémités (fig. 12).
Soit AC $= a$ CO $= b$
I_1 moment d'inertie AC
I_2 moment d'inertie de CO
O le milieu de la barre
AC et DB représentent les tôles flexibles.

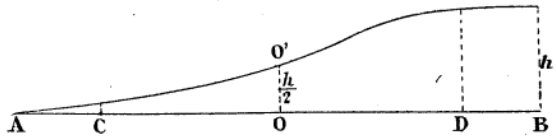


Fig. 12.

Supposons qu'on fasse subir à la barre un effort qui déplace le point B de la quantité h sans supprimer l'encastrement. A cause de la symétrie le point O se relèvera de $\frac{h}{2}$ et le moment de flexion sera nul en O', point d'inflexion.

Soient μ_0 le moment d'encastrement en A.
V_0 l'effort tranchant.

Aucune charge n'agit sur la barre entre A et B; on a alors les relations suivantes :

$$\left.\begin{array}{lll} \text{de A en C.....} & M = \mu_0 + V_0 x \\ \text{en C.....} & M_1 = \mu_0 + V_0 a \end{array}\right\}$$

$$\begin{array}{lll} \text{de C en O.....} & M = M_1 + V_0 x \\ \text{en O.....} & 0 = M_1 + V_0 b = \mu_0 - V_0 (a+b) \text{ (1)}, \end{array}$$

équation qui donnera μ_0 en fonction de V_0.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par suite :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{EI_1}(\mu_o + V_o x) \text{ de A en C.}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{EI_1}\left(\mu_o x + V_o \frac{x^2}{2}\right)$$

$$\text{en C.....} \quad \varphi_1 = \frac{1}{EI_1}\left(\mu_o a + V_o \frac{a^2}{2}\right)$$

$$y = \frac{1}{EI_1}\left(\mu_o \frac{x^2}{2} + V_o \frac{x^3}{6}\right)$$

$$\text{en C.....} \quad y_1 = \frac{1}{EI_1}\left(\mu_o \frac{a^2}{2} + V_o \frac{a^3}{6}\right)$$

de C en O :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{EI_2}(M_1 + V_o x)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{EI_2}\left(M_1 x + V_o \frac{x^2}{2}\right) + \varphi_1$$

$$y = \frac{1}{EI_2}\left(M_1 \frac{x^2}{2} + V_o \frac{x^3}{6}\right) + \varphi_1 x + Y_1.$$

Cette dernière relation appliquée au point O donne :

$$\frac{Eh}{2} = \mu_o\left(\frac{a^2}{2I_1} + \frac{ab}{I_1} + \frac{b^2}{2I_2}\right) + V_o\left(\frac{a^3}{6I_1} + \frac{a^2b}{2I_1} + \frac{ab^2}{2I_2} + \frac{b^3}{6I_2}\right).$$

Remplaçant μ_o par sa valeur en fonction V_o tirée de (1) il vient :

$$V_o = -\frac{Eh}{2} - \frac{1}{\frac{(a+b)^3}{3I} + \frac{b^3}{3}\left(\frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1}\right)}$$

et par suite :

$$\mu_o = \frac{Eh}{2}\left\{\frac{a+b}{\frac{(a+b)^3}{3I} + \frac{b^3}{3}\left(\frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1}\right)}\right.$$

On a, par suite, pour le travail maximum en A :

$$R = \frac{\mu_o n}{I_1} = \frac{Ehn}{2}\left\{\frac{a+b}{\frac{(a+b)^3}{3} + \frac{b^3}{3}\left(\frac{I_1}{I_2} - 1\right)}\right\}$$

n étant la distance de la fibre extrême à l'axe neutre.

Si I_1 est très petit par rapport à I_2 on a :

$$R = \frac{Ehn}{2} \cdot \frac{a+b}{\frac{(a+b)^3}{3} - \frac{b^3}{3}} = \frac{3Ehn(a+b)}{2[(a+b)^3 - b^3]}.$$

Pour $a = o$ on a $R = \infty$.

Mais si l'on prend des épaisseurs toujours égales au $\frac{1}{10}$ de la longueur, n est $\frac{a}{20}$ et pour $a = o$, $R = \frac{o}{o}$; en supprimant un facteur commun, il vient $R = \frac{3Eh}{120b}$, quantité finie, comme $\frac{h}{b}$ est au plus égal à $\frac{2}{1000}$, on a $R = 1^{kg},00$ par millimètre carré.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PONTS AVEC VOUTES EN BRIQUES.

Lorsque le tablier des ouvrages est construit avec des voûtes en briques, les résultats du calcul ordinaire sont complètement faussés. En général, les voûtes en briques soulagent les membrures voisines en prenant pour leur compte une partie notable des efforts.

INDICATION DE QUELQUES PRÉCAUTIONS A PRENDRE DANS L'EMPLOI DES APPAREILS DE M. RABUT.

I. On constate souvent dans les expériences qu'après l'enlèvement de la charge les aiguilles ne reviennent pas absolument à leur point de départ. Nous estimons que, dans les expériences sur les treillis, il convient après une première expérience de faire sortir le train par l'extrémité par laquelle il est entré, de constater la position de l'aiguille, puis de recommencer l'expérience en faisant toujours sortir le train par l'extrémité par laquelle il est entré. Dans cette seconde expérience nous avons presque toujours constaté que l'anomalie qui s'était présentée dans la première ne se produisait pas, attendu qu'elle est due à ce que l'ouvrage n'a pas eu à supporter antérieurement des charges équivalentes à celles réalisées par les expériences et à ce que l'effort change de sens quand le train a dépassé la barre soumise à l'expérience.

II. Il faut toujours mesurer très exactement sur place la section des barres dont on veut connaître le travail. Les écarts considérables de la théorie et de l'expérience sont dus souvent à ce que la section réelle des barres n'est pas du tout la même que celle qui a servi à faire les calculs théoriques.

III. Lorsqu'on veut étudier le travail d'une barre, il faut installer sur cette barre aussi près que possible des nœuds d'attache de la partie de la barre à étudier, deux groupes de trois appareils au moins et toujours au moins un sur chaque tranche, chaque groupe correspondant à une section droite. Il ne doit jamais exister de nœud d'attache avec d'autres barres entre les deux groupes d'appareils.

IV. Tenir compte pour les pièces peu larges de la distance de l'axe des tiges au bord le plus voisin des pièces que l'on étudie.

V. *Autant que possible*, combiner les manœuvres et les lectures, de telle sorte qu'entre deux lectures consécutives la déformation à mesurer ne change pas de sens.

LANNA.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

XVI

FABRICATION

DES

MAILLONS DE CHAINE EN ACIER MARTIN

UTILISÉS

DANS LA CONSTRUCTION DU PONT SUSPENDU D'ESKÜTÉR

DE BUDAPEST (HONGRIE)

COMMUNICATION

Présentée par M. Jules SEEFEHLNER

DIRECTEUR DES ATELIERS DE CONSTRUCTION DE MACHINES DES CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT HONGROIS, A BUDAPEST

I. — INTRODUCTION

Le pont d'**Eskütér** de Budapest, en construction depuis 1897, est un pont suspendu à chaînes qui franchit le Danube en une seule portée, tandis que des ouvertures de côté surplombent les quais des deux rives.

La portée principale, sur le fleuve, est de 290 mètres, les deux autres, chacune de $42^{m},30$; soit au total $374^{m},60$, la largeur utilisable est de 18 mètres, dont 11 mètres de chaussée, le reste de trottoir (fig. 1). La vue en perspective du pont est représentée à la figure 2 d'après le dessin mentionné ci-dessous (observation[1]).

La construction du pont à commencé en 1897 et ne finira qu'en septembre 1902. Les frais, rien que de la partie métallique, qui sera livrée par les ateliers de construction des machines des chemins de fer de l'État et par l'aciérie royale Hongroise **Diosgyör**, et qui sera montée par le premier de ces établissements, s'élèvent à 6 600 000 couronnes; les autres travaux à 4 200 000 couronnes; en tout 10 800 000 couronnes.

1. Observation. Le modèle d'ensemble du pont se trouve à l'Exposition de Paris, dans le Groupe VI, Génie civil, Classe hongroise du ministère du Commerce. Le montage des pièces dans les ateliers de construction (ateliers des chaînes) des chemins de fer royaux Hongrois de Budapest est représenté par des modèles.

Dans le Groupe XI, Mines et métallurgie, figure en grandeur naturelle un groupe des plus longues chaînes; ainsi que des photographies du mode de fabrication et le dessin du pont fini.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

II. — MÉTAL A EMPLOYER DANS LA CONSTRUCTION DE LA PARTIE MÉTALLIQUE

a. — CHAÎNES PORTEUSES

Les différentes parties de maillons des chaînes sont fabriquées, d'après les cahiers des charges, en tôle d'acier coulé Martin (sans soudure et venue d'un seul morceau). On exige que les tôles soient lisses et d'épaisseur partout uniforme, exemptes de défauts à la surface, et de criques ou d'exfoliations sur les bords. De plus le métal doit être d'une ténacité déterminée et présenter une cassure brillante, d'un bleu clair et doit avoir le grain fin. Toute tôle présentant criques, cavités ou autres soufflures, impuretés ou exfoliations, ou qui se déchirerait ou se romprait au poinçonnage ou au cisaillage doit être soigneusement écartée.

De même on doit exclure toute tôle qui présente à la surface de nombreux

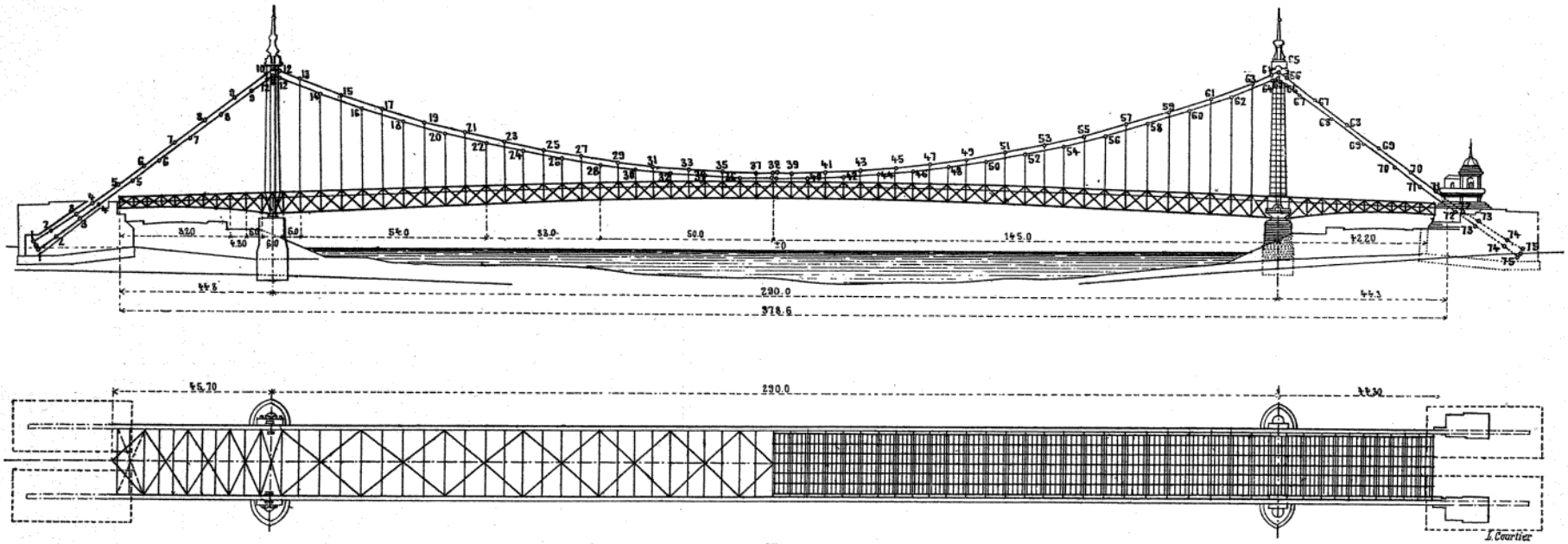


Fig. 1.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

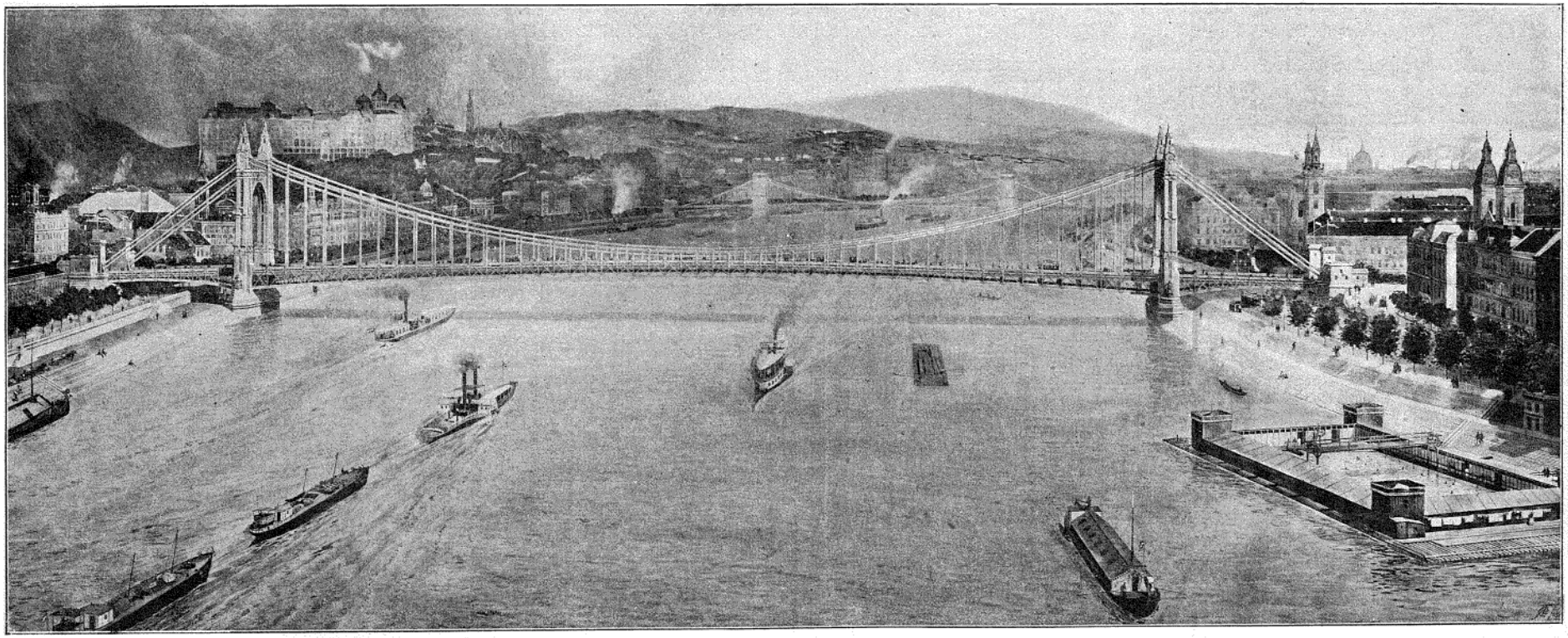


Fig. 2.

défauts, lesquels ne seraient susceptibles de disparaître que sous l'action de moyens mécaniques plus puissants.

Les tôles d'acier Martin, pour être utilisées, doivent avoir une résistance au déchirement de 5000 à 5500 kilogrammes dans la direction du laminage, effort rapporté à la section géométrique et présenter en même temps un allongement de 20 %. Ces conditions s'appliquent à des éprouvettes de 5,0 centimètres carrés; pour celles de section plus forte on exige un allongement relativement plus fort, soit 1 % en plus pour une augmentation de 1 centimètre carré de la section.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En dehors de ces essais, il faut soumettre le métal aux essais de flexion suivants :

Les éprouvettes de 5 à 8 centimètres de largeur doivent, à froid, pouvoir s'enrouler sur un mandrin de diamètre égal au double de l'épaisseur de la tôle.

Au rouge ou au bleu naissant, les angles doivent pouvoir être pliés et rabattus au marteau, sans se déchirer.

Le métal, destiné aux tôles d'acier pour chaînes, contiendra :

Carbone	0,12 à 0,15 pour 100
Silicium	0,20 —
Manganèse	0,50 à 1 —
Phosphore	0,06 à 0,08 —

Le restant de la coulée (Ingot), quand on a prélevé la partie supérieure, jusqu'à concurrence de 250-300 kilogrammes est soumis au laminage, d'abord dans le sens de la longueur, ensuite dans le sens perpendiculaire. De plus on fait en sorte de couper les extrémités des bandes de métal après laminage, de façon à ce que la partie, qui entre dans la constitution des tôles de maillons, soit vraiment la meilleure.

b. — MÉTAL POUR LA CONSTRUCTION

On applique, à la fonte Martin qui sera employée, les prescriptions indiquées précédemment; du moins pour les grandes lignes. En ce qui concerne les conditions se rapportant à la qualité, on exige pour la résistance au déchirement, dans le sens du laminage, 3500 à 4500 kilogrammes par centimètre carré en même temps qu'un allongement de 28 % à 22 %. Ces valeurs s'appliquent à des éprouvettes n'ayant pas plus de 4 centimètres carrés de section et une longueur de 200 millimètres. Dans la direction perpendiculaire à celle du laminage, la résistance au déchirement doit être la même; par contre l'allongement peut n'être que de 26 % à 20 % en dehors de ce point, les essais habituels à la flexion doivent être prescrits.

Pour l'acier Martin, dont on fera les patins d'ancrage de la chaîne, on exige une résistance de 5700 par centimètre carré et un allongement de 10 %.

Pour les parties forgées en acier Martin, des pièces de suspension de la chaîne, la résistance au déchirement est de 6000 à 6500 par centimètre carré et l'allongement de 15 %.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

III. — FABRICATION DES MAILLONS

a. — FORMES ET DIMENSIONS

La forme des maillons (fig. 3) ne diffère pas en général de celle en usage pour les ponts jusqu'à ce jour; seulement pour la détermination de la forme de la tête on procède à des essais spéciaux au déchirement.

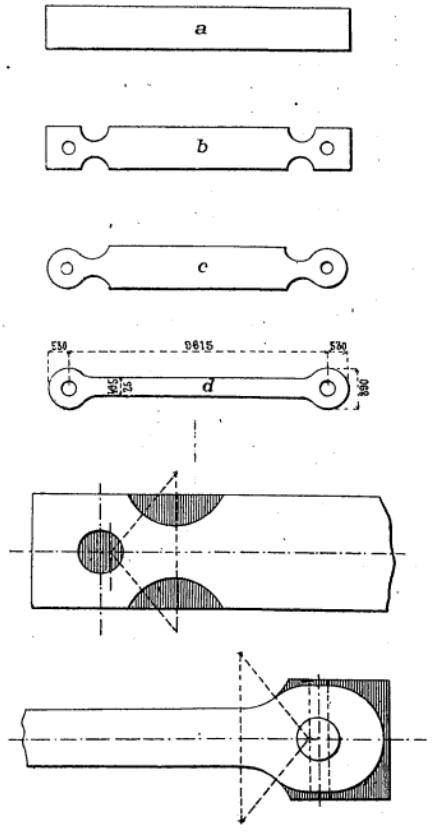


Fig. 3.

On a résumé, dans le tableau ci-joint, les dimensions principales et le nombre des maillons et il est facile d'en déduire quels puissants moyens d'action a exigé la constitution de ces grands maillons, et quel travail gigantesque cela a été, eu égard au peu de temps employé, 19 mois et au poids des matériaux, 4 273 000 kilogrammes.

TABLEAU.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Principales données sur les maillons.

NUMÉRO DU POSTE.	LONGUEURS.		LARGEUR DANS LE MILIEU.	ÉPAISSEUR.	NOMBRE DE PIÈCES.
I	**1° Maillons.**				
a	Maillons normaux	13.756	440 mm.	25 mm.	160
	—	13.600	430 —	25 —	480
	—	13.135	500 —	25 —	240
	—	12.718	420 —	25 —	312
	—	12.718	420 —	15 —	16
	—	12.046	410 —	25 —	624
	—	12.046	410 —	15 —	32
	—	11.709	465 —	25 —	176
	—	11.678	460 —	25 —	352
	—	11.585	400 —	25 —	168
	—	10.881	400 —	25 —	388
	—	10.881	480 —	25 —	24
	—	10.875	495 —	25 —	80
	—	10.670	490 —	25 —	152
	—	10.671	490 —	15 —	16
		a	»	»	3.220
b	Maillons anormaux (*)	14.605	600 mm.	25 —	160
	—	9.792	600 —	25 —	176
	—	6.969	530 —	25 —	152
	—	5.007	680 —	25 —	80
	—	4.084	1100 —	25 —	144
	—	4.065	1090 —	25 —	80
	—	2.159	730 —	25 —	78
	—	2.159	730 —	15 —	4
		b	»	»	874
		a + *b*	»	»	4.094
II	**2° Chevilles.**				
	Maillons normaux	1.495	340 mm.		4
	—	1.495	310 —		24
	—	1.485	320 —		64
	—	1.471	330 —		20
	—	1.305	270 —		24
	—	1.305	260 —		34
	Maillon anormal	»	»		32
		II	»	»	202

(*) Ces maillons sont pour la plus grande partie en forme de trapèze.

b. — PRESCRIPTIONS POUR LA CONFECTION

Pour toutes les pièces destinées aux chaînes, le coupage à la cisaille et le poinçonnage ne sont pas autorisés.

Les trous de boulons des maillons réunis par le même boulon doivent être percés simultanément au diamètre exact. Les différentes distances des trous des boulons sont à observer à : 10 Celsius jusqu'à 2 millimètres près; tandis que pour le diamètre du trou lui-même, on tolère tout au plus une différence de 1 millimètre. Le diamètre du boulon doit être déterminé avec une approximation de 1/2 millimètre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

c. — HISTORIQUE DE LA FABRICATION DES CHAÎNES

L'invention des ponts à chaînes est attribuée aux Chinois, qui vraisemblablement auraient construit de ces ponts déjà avant Jésus-Christ. Ces ponts à chaînes ordinaires étaient construits de telle sorte que le plancher de la route reposait immédiatement sur les chaînes tendues à plat, et perpendiculairement à ces dernières. Il convient de remarquer qu'en 1741 on exécuta un pont tout à fait semblable en Amérique; et que l'ingénieur américain Finlay aussitôt après, en 1796, exécutait un plancher suspendu par l'intermédiaire de barres. Après la substitution, en 1811, dans la marine anglaise, de la chaîne soudée au câble pour l'ancrage, le fabricant de cette chaîne, Samuel Brown, dans ses ateliers de forges à chaînes, près de Londres, appliqua à un pont les premiers maillons à tôle plate sur champ. C'est par suite l'inventeur de la forme de chaîne usitée encore à ce jour.

Les ingénieurs bien connus, Telford et Brunel, perfectionnèrent le système de ponts à chaînes et exécutèrent sur ce modèle les plus grands ponts. Clark construisit le plus grand pont de ce système, le pont à chaînes de Budapest, 1839-1849; après quoi, à cause de son peu de rigidité, ce système fut complètement abandonné.

Beaucoup plus tard, les ingénieurs américains reprirent la forme de maillons pour la partie soumise à la traction de leurs ponts métalliques à plat, et atteignirent, en se confinant dans l'emploi de pièces de dimensions moyennes, une perfection particulière de construction par l'emploi de presses de différentes sortes.

On voit par là qu'il n'existait pas antérieurement de procédé de fabrication pouvant servir de modèle pour les gigantesques maillons du pont d'**Eskütér**; c'était donc une méthode à trouver, laquelle devait, non seulement permettre la construction en raison des conditions spéciales indiquées précédemment, mais aussi répondre aux exigences résultant des dimensions importantes des maillons et du délai relativement court laissé pour la construction.

d. — MARCHE GÉNÉRALE DE LA FABRICATION

Aux termes des cahiers des charges, il y a lieu de dresser parfaitement les tôles entrant dans la constitution des maillons; on y arrive en faisant passer la tôle plusieurs fois dans une puissante machine à dresser les tôles. L'attention devra se porter principalement sur le dressage de celles des parties de tôles réunies par le même boulon, la moindre des choses peut avoir des suites fâcheuses. Ces tôles étant ainsi dressées avec le plus grand soin et mises sur des marbres, des chefs ouvriers bien stylés y tracent le profil exact du maillon. Les jauges étant du même métal que les maillons, il n'y a pas à s'occuper de l'influence de température.

Comme dans la suite des opérations, les maillons sont presque constamment exposés aux projections de liquide gras provenant des outils, on les enduit de vernis.

Ces pièces sont soumises aux opérations suivantes : découpage du trou du boulon à une cote approximative et en même temps découpage à la cote exacte de la courbure intérieure des têtes de maillon, travail qui s'exécute à l'aide de deux machines disposées perpendiculairement et dans l'axe de la pièce, machine à percer et machine à découper. Ensuite la pièce est amenée devant des machines à fraiser disposées par paire (fig. 4) qui enlèvent le reste de la matière à prendre à la tête.

La matière qui se trouve sur la partie droite située entre les deux têtes est enlevée en même temps des deux côtés, ainsi se trouvent terminés les maillons avant le percement à la cote exacte des trous de boulon. Dès qu'un nombre suffisant de ces maillons en est à ce point, on les dispose devant une machine à percer horizontale et on perce en même temps tous les trous de boulon au diamètre prévu (fig. 5). Enfin on dispose les maillons finis dans l'atelier de montage par groupes d'au moins trois à cinq avant leur départ de l'usine (fig. 6) et cela dans le but de relever toutes les cotes prescrites et d'après cela de faire les groupe-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

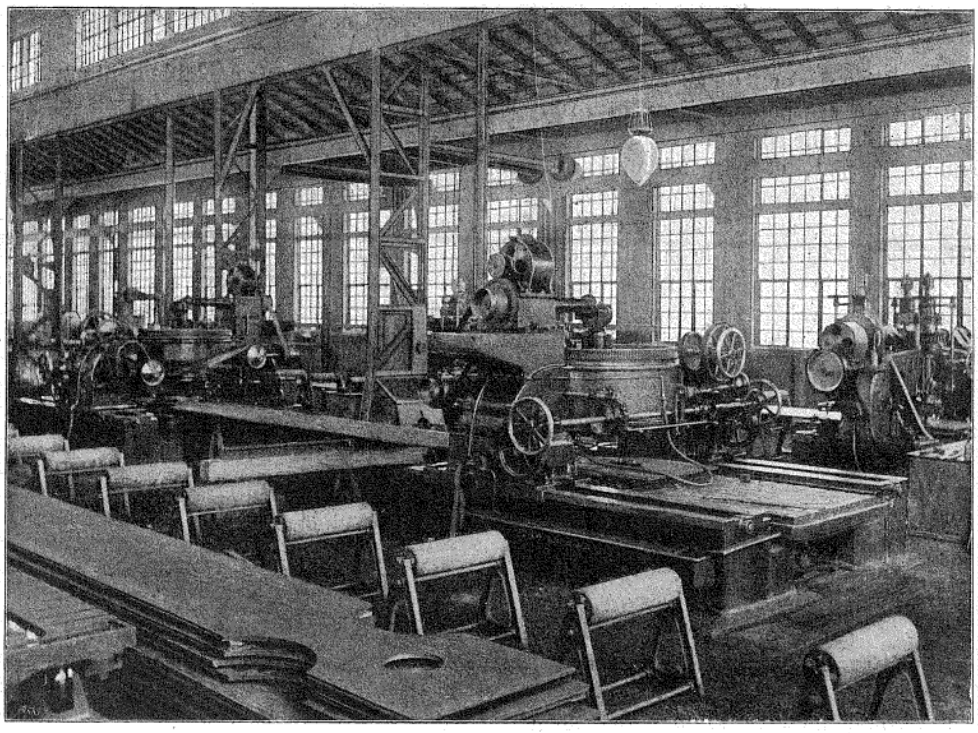


Fig. 4.

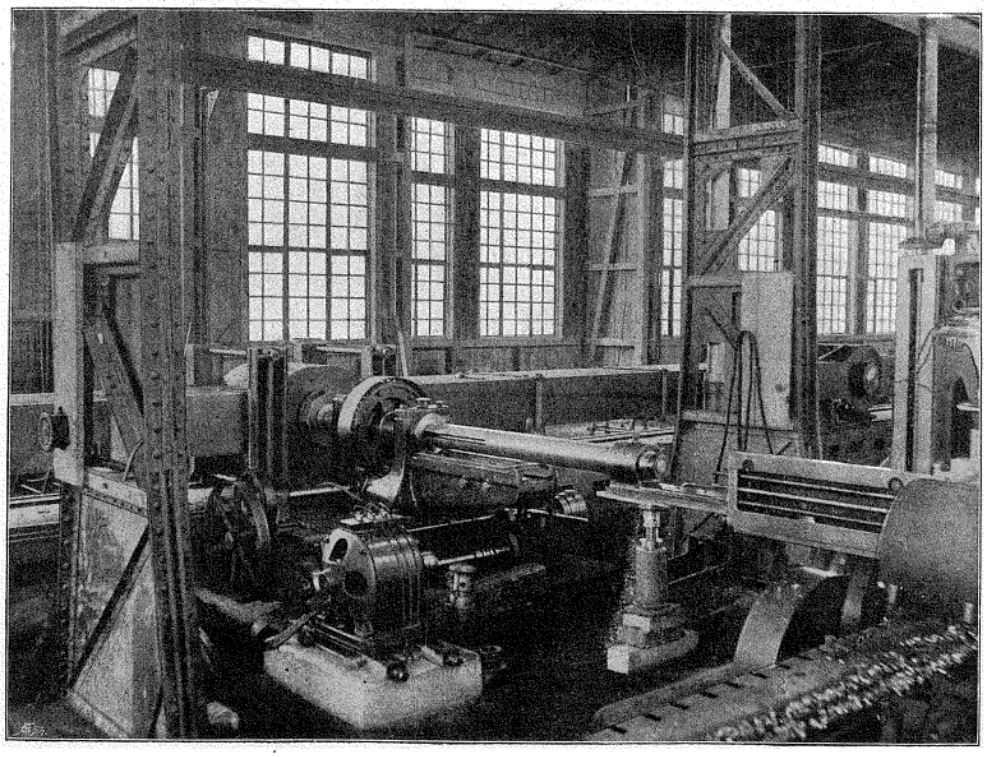


Fig. 5.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ments. Les parties de maillons sont réunies par deux ou trois et déposées dans le magasin jusqu'à ce qu'ils soient emmenés.

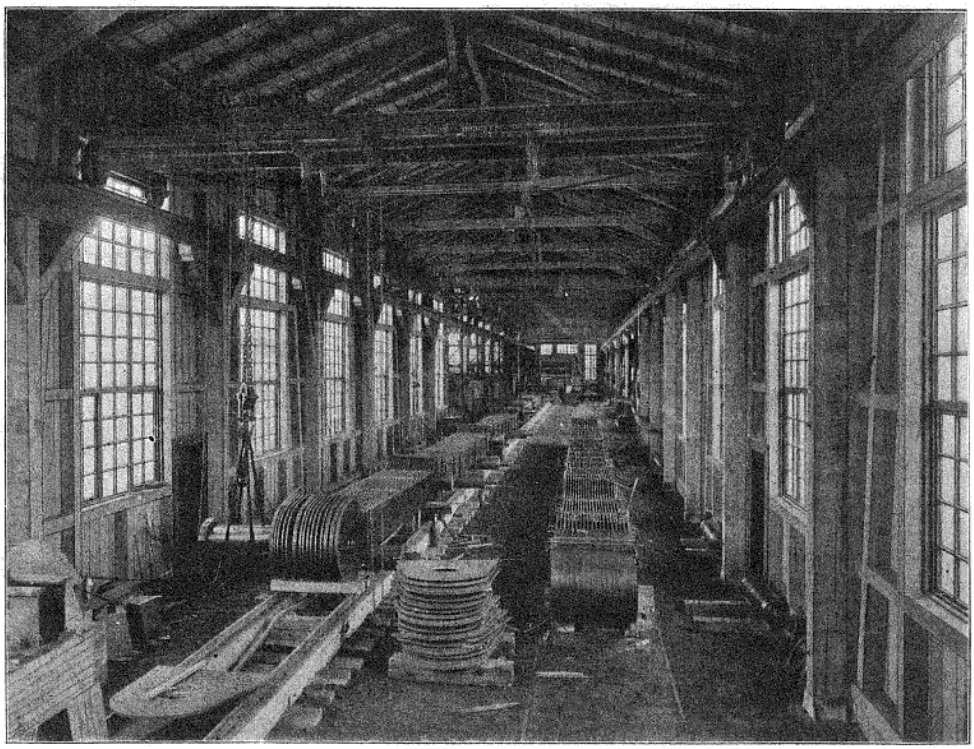


Fig. 6.

Pour se fixer sur le rendement des machines outils, livrés par la fabrique « Vulcan », de Budapest, il convient de remarquer que les durées des opérations pour un maillon sont les suivantes :

Sur les tables à tracer.	126 minutes.
Autant à la machine à découper.	126 —
A la machine à fraiser.	105 —
A la machine à raboter	130 —
A la machine à percer horizontalement.	128 —
En tout (sans le transport)	615 minutes.

On peut citer comme modèle le travail des machines, et rappeler comme preuve de l'exactitude de celles-ci le fait suivant :

Dans les premiers groupes (au montage des maillons sur le chantier) une des tôles de maillons, par mégarde, ne vint pas à sa place d'après le repère et on ne s'en aperçut pas. Les tôles de maillons sont donc permutables sans inconvénient.

C'est là le témoignage certain de l'état brillant où se trouve l'industrie du fer et de la mécanique en Hongrie, de même que de l'état de développement de l'art de la construction des ponts.

JULES SEEFEHLNER.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

XVII

MÉTHODE D'ÉPREUVE

DES CONSTRUCTIONS EN BÉTON ARMÉ

COMMUNICATION

Présentée par M. CONSIDERE

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES, CORRESPONDANT DE L'INSTITUT

NÉCESSITÉ DES ÉPREUVES DIRECTES POUR LES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ

L'ingénieur chargé de la construction d'un ouvrage métallique fait faire à l'usine les essais nécessaires pour déterminer les caractéristiques des métaux à employer : résistance, limite d'élasticité, allongement de rupture et striction. A l'avenir, il devra mesurer aussi la fragilité du métal au moyen des épreuves dont les travaux de la Commission des méthodes d'essai ont démontré la facilité et l'utilité.

Il surveille la construction où les malfaçons deviennent de plus en plus rares et moins dangereuses par suite de l'emploi des riveuses mécaniques. S'il s'en produit néanmoins, on peut les constater, même après coup, en faisant sauter des rivets, et quand vient le jour des épreuves, il ne peut guère se produire d'imprévu si le type de l'ouvrage a reçu la sanction de l'expérience. Aussi les flèches que les ouvrages métalliques subissent au cours des épreuves, sont presque identiques à celles qui ont été prévues et, par suite, leur constatation ne présente guère d'utilité.

La mesure des déformations locales donne, au contraire, de précieux renseignements sur la répartition des efforts et permet d'apprécier les avantages et les inconvénients des divers types de construction, mais il est rare qu'elle révèle des défauts d'exécution ou de matière.

On peut donc dire que, pour les ouvrages métalliques, ce sont les essais préalables des matériaux et la surveillance de l'exécution qui donnent les garanties nécessaires.

Il en est tout autrement des constructions en béton armé, car les essais de laboratoire ne renseignent que sur les qualités des matériaux employés, et la surveillance la plus active ne saurait empêcher sûrement les malfaçons et les vices de fabrication qui peuvent détruire la résistance des constructions faites avec les meilleurs matériaux.

En effet, le dosage du béton peut, malgré la surveillance, n'être pas partout conforme au devis; la quantité d'eau employée dans le malaxage devant, pour produire des résultats identiques, varier dans une mesure très large suivant l'état hygrométrique des matières et de l'atmosphère, il est certain, *a priori*, qu'elle sera parfois mal proportionnée. Si elle est trop forte, la résistance du béton et surtout son coefficient d'élasticité seront diminués dans une mesure qui peut être considérable; si elle est trop faible, l'adhérence du béton et des armatures ne sera pas suffisante.

Le pilonnage exerce une influence plus grande encore sur la solidité de l'ouvrage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Aux défauts d'exécution peuvent s'ajouter des vices de disposition qu'on doit redouter particulièrement dans un genre de constructions nouveau dont la théorie n'est pas encore faite.

INSUFFISANCE DES HYPOTHÈSES FAITES POUR CALCULER LES DÉFORMATIONS

Quels qu'aient été les résultats des essais des matériaux employés, on ne peut donc être renseigné sur la solidité d'une construction en béton armé que par des épreuves directes. Mais les déformations constatées ne donneront d'indications vraiment utiles que si on les compare aux déformations normales qui auraient dû se produire eu égard aux qualités des matériaux employés et aux dispositions adoptées. Or, il semble que jusqu'à présent, on n'est pas en possession d'une méthode qui permette de calculer ces déformations normales.

On a admis tantôt que le béton armé conserve, quelle que soit sa déformation, le coefficient d'élasticité qu'on constate dans les essais ordinaires de traction, tantôt que la résistance des fibres de béton qui travaillent par traction, est négligeable dans les pièces armées, tantôt qu'elle ne le devient que lorsque les déformations dépassent l'allongement qui produit la rupture dans les essais ordinaires de traction. Aucune de ces hypothèses n'a donné de résultats concordant avec la réalité.

Il se produit donc certainement, dans les constructions armées, des phénomènes particuliers dont la connaissance est nécessaire pour prévoir leur résistance et leurs déformations.

LOI DE DÉFORMATION DU BÉTON COMPRIMÉ

Le béton qui travaille par compression étant, en général, dépourvu d'armatures, ce n'était pas de ce côté qu'on pouvait découvrir la cause des anomalies signalées. Il suffit de rappeler la loi bien connue de la déformation du béton comprimé et de la préciser en appelant « coefficient instantané d'élasticité » le quotient d'une variation infiniment petite de pression ou de tension par la variation de longueur qu'elle produit.

Quand la pression augmente en restant inférieure à un chiffre qui, en général, se rapproche du tiers de la charge de rupture, le coefficient instantané diminue, mais dans une très faible mesure. Lorsque la charge devient plus forte, l'altération de l'élasticité augmente graduellement; elle est notable pour une pression voisine de la moitié de la résistance et croît ensuite si rapidement qu'avant la rupture, le coefficient instantané peut devenir inférieur au 1/20 de sa valeur sous faible charge.

Cette allure de la déformation est analogue à celle que l'on constate généralement pour tous les matériaux.

La loi simple qui régit la déformation du béton comprimé, ne pouvant donner l'explication des anomalies observées, il fallait la chercher dans les phénomènes qui se produisent dans la traction.

LOI DE DÉFORMATION DU BÉTON SOUMIS A UNE PREMIÈRE TRACTION

Les ingénieurs qui étudiaient la question, se trouvaient en présence de ces deux faits, en apparence contradictoires, que les mortiers et bétons, ayant les dosages habituels, se brisent par traction avec des allongements inférieurs à 1/10 de millimètre et qu'on n'observe pas de fissures dans des pièces en béton armé dont les faces tendues ont supporté des allongements allant jusqu'à 1 millimètre par mètre. Toutefois on ignorait si les fibres, intactes en apparence, ne renferment pas des fissures invisibles que les armatures empêchent d'apparaître, ou si elles n'ont pas subi d'autres altérations qui leur enlèvent leur résistance.

Nous avons entrepris des expériences pour élucider la question et il a été rendu compte, le 12 décembre 1898, à l'Académie des sciences, de celles qui ont été faites sur des prismes armés travaillant par flexion.

Depuis lors, nous avons fait des expériences sur des prismes armés soumis à la traction simple et leurs résultats seront publiés prochainement.

Il faudrait reproduire les considérations longues et délicates qui ont été exposées ailleurs, pour montrer comment les lois de la traction simple ont pu être déduites des phénomènes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

complexes de la flexion. Il suffit, au contraire, de quelques mots pour expliquer la méthode employée pour les démontrer au moyen des résultats d'essais de traction simple.

Des prismes de mortier pourvus d'armatures symétriques ont été soumis à des tensions dirigées suivant leurs axes. Pour chaque charge on a mesuré, d'une part, les allongements des armatures; d'autre part, ceux des faces du prisme qui étaient sensiblement égaux à ceux des armatures, sauf aux extrémités.

A un allongement a des armatures qui avaient une section s et un coefficient d'élasticité E′, correspondait un effort produit par le métal égal à saE'.

Le poids qui avait causé ces déformations étant P, l'effort total produit par le mortier était $P - SaE'$ et sa tension par centimètre carré était $\frac{P - saE'}{S}$. S étant la section du mortier.

Voici les conclusions qui ont été déduites des essais de flexion dans la note présentée à l'Académie et qui ont été confirmées par l'examen des essais de traction :

« Tant que le mortier armé ne supporte que des tensions et des allongements inférieurs ou égaux à ceux qu'il pourrait subir sans se rompre dans les prismes non armés, son coefficient d'élasticité reste sensiblement constant et, par suite, les tensions augmentent presque proportionnellement aux allongements. C'est la période d'élasticité de tous les éléments de la construction armée.

« Lorsque les déformations dépassent cette limite, le mortier s'allonge de plus en plus sans que sa tension s'accroisse notablement et, par suite, son coefficient instantané d'élasticité devient presque nul.

« La courbe de déformation des mortiers et bétons armés qui travaillent par traction

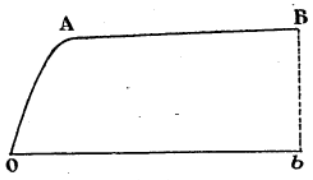


Fig. 1.

affecte donc la forme OAB (fig. 1), les allongements étant portés en abscisses et les tensions en ordonnées.

« L'allongement Ob que le mortier armé supporte sans rupture, peut atteindre 1 et même 2 millimètres par mètre, c'est-à-dire des valeurs dix à vingt fois supérieures à celles qui déterminent toujours la rupture par traction des mortiers ou bétons non armés. »

Quoiqu'une expérience si simple semble ne pouvoir donner lieu à des erreurs notables, il a paru utile d'en contrôler les résultats par une autre méthode.

Après avoir soumis différents prismes à des essais de traction ou de flexion dans lesquels le mortier avait subi des allongements allant jusqu'à 2 millimètres par mètre et dont l'un avait supporté 139 052 répétitions d'un allongement variant de $0^{mm},545$ à $1^{mm},270$ par mètre, on en a détaché, au moyen de la scie à sable, des baguettes longitudinales dans lesquelles il ne restait pas de métal. Ces baguettes de mortier non armé ont été essayées par flexion et ont donné des résistances égales et parfois supérieures à celles que donnait un mortier analogue qui n'avait été soumis à aucune déformation préalable.

Les baguettes n'ont jamais pu être détachées sans rupture sur toute la longueur des prismes qui était de $0^{m},60$, mais on a obtenu des morceaux intacts de $0^{m},200$.

Cet essai confirme donc la conclusion que l'on avait tirée des mesures de déformation et on peut affirmer que les mortiers et bétons sont capables de supporter, dans les pièces armées, non seulement sans se rompre, mais sans rien perdre de leur résistance, des allongements très supérieurs à ceux qui brisent les mortiers et bétons non armés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

EXPLICATION DU GRAND ALLONGEMENT DU BÉTON ARMÉ

L'énorme différence des allongements que les mortiers et bétons peuvent supporter suivant qu'ils sont, ou non, armés, semble, à première vue, paradoxale; nous en avons donné ailleurs l'explication détaillée, qu'il n'y a pas lieu de répéter ici. Il suffira de dire que les armatures n'augmentent pas l'allongement moléculaire dont ces matériaux sont capables, mais que par le secours très efficace qu'elles donnent aux sections qui tendent à céder prématurément, elles égalisent l'allongement dans toute la longueur des fibres soumises aux mêmes efforts, tandis que, dans les mortiers non armés, la section la plus faible prend seule l'allongement maximum dont la matière est capable et se brise, alors que le reste de la longueur n'a subi qu'un allongement minime accusé par les mesures prises entre deux repères.

En d'autres termes, il se produit une striction dans le mortier non armé comme dans les métaux, et l'association avec des matériaux plus résistants l'empêche dans le béton armé. Quoique ce soit évident, il convient de faire remarquer que les armatures ne peuvent communiquer au mortier cette ductilité notable que lorsque leur section relative est suffisante et lorsqu'elles sont assez rapprochées des fibres qui subissent les plus forts allongements pour pouvoir les secourir efficacement.

EFFETS DES RÉPÉTITIONS D'EFFORTS

La connaissance des courbes de déformation correspondantes à un premier chargement suffirait pour calculer les déformations dans les épreuves habituelles des constructions en béton armé qui ne comportent qu'une seule mise en charge; mais il importe de savoir aussi comment ces constructions se déforment dans les épreuves répétées dont l'utilité peut être reconnue.

La figure 2 représente la loi de la déformation du mortier dans les pièces armées soumises à des charges croissantes séparées par des retours à l'équilibre.

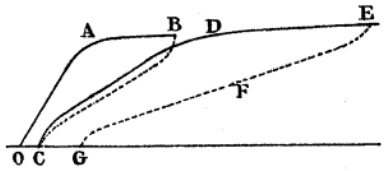


Fig. 2.

Si l'on supprime graduellement la charge après avoir poussé l'épreuve jusqu'au point B, la courbe BC qui représente la déformation pendant le chargement, est presque rectiligne, sauf aux extrémités. La déformation permanente qui persiste après le déchargement, est OC.

Si l'on recharge jusqu'en E et qu'on décharge de nouveau, on obtient successivement les courbes CDE et EFG qui, comme BC, sont presque rectilignes et d'autant moins inclinées sur l'horizon que la déformation a été poussée plus loin.

La notion précise du coefficient instantané d'élasticité, c'est-à-dire de l'inclinaison sur l'horizontale de la tangente à la courbe de déformation permet de résumer brièvement les lois de la déformation du mortier ou béton travaillant par traction dans les pièces armées :

« Pendant le premier chargement, le coefficient instantané d'élasticité, égal à celui du mortier non armé tant que l'allongement ne dépassé pas la valeur qui produirait la rupture du même mortier non armé, diminue très rapidement si la déformation dépasse cette limite et devient presque nul.

« Lorsqu'une pièce armée est soumise à des successions de déchargements et de rechargements, le coefficient instantané a, dans l'une quelconque de ces opérations, une valeur à peu près constante et d'autant plus faible que la déformation maximum a été plus grande.

« La répétition des mêmes efforts produit une diminution du coefficient d'élasticité qui est d'abord notable, mais qui tend vers zéro. »

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

LES FISSURES CAPILLAIRES INFLUENT SUR LA FATIGUE DES MATÉRIAUX MAIS NON SUR LES DÉFORMATIONS

Telles paraissent être les lois de la déformation des mortiers mises en évidence par des expériences de laboratoire faites avec de grandes précautions. Elles font connaître ce que le mortier ou le béton parfaitement sain *peut donner* et non ce qu'on est certain d'obtenir des matériaux qu'on obtient pratiquement sur les chantiers, car les pièces armées renferment parfois des fissures dont on doit tenir compte dans le calcul des dimensions qu'il convient de leur donner. C'est une question importante au point de vue du calcul des pièces armées, mais pour les raisons suivantes, il n'y a pas lieu de se préoccuper des fissures au sujet des épreuves qui seules sont étudiées dans ce rapport.

C'est un fait constaté que dans les constructions armées bien établies et non exposées à une dessiccation excessive, il ne se produit qu'exceptionnellement des fissures visibles à la loupe avant ou pendant les épreuves habituelles.

D'autre part, les expériences de laboratoire prouvent que les fissures qu'on produit en augmentant suffisamment les charges au delà des limites respectées dans les épreuves, n'exercent pas d'influence notable sur l'allure de la déformation tant qu'elles ne sont pas visibles à l'œil nu, et on pouvait le prévoir en remarquant qu'une fissure n'influe que sur une fraction minime de la longueur de la pièce essayée.

On doit en conclure que les déformations qui se produisent dans les épreuves pratiquement imposées aux constructions, ne sont pas influencées, dans une mesure appréciable, par les fissures invisibles qui peuvent préexister ou se produire au cours des épreuves.

MÉTHODE RIGOUREUSE DE DÉTERMINATION DES DÉFORMATIONS

Il en résulte que connaissant les lois de la déformation des armatures et du béton d'une pièce armée, on a tous les éléments nécessaires pour calculer les déformations qu'elle peut subir sous une charge quelconque assez modérée pour ne pas la fissurer fortement et notamment sous la charge d'épreuve.

La comparaison des déformations qui se produiront réellement dans les épreuves à celles qu'on aura ainsi calculées, donnera, on le verra plus loin, des renseignements précieux, non seulement sur la résistance des pièces essayées, mais aussi sur la nature du danger le plus proche qui les menace.

On va voir comment on peut calculer les déformations normales qui doivent se produire, si l'on admet les deux hypothèses usuelles de la conservation des sections planes et de l'absence d'efforts intérieurs avant la mise en charge, sauf à examiner ensuite la valeur de ces hypothèses.

Dans les essais des constructions armées, on mesure, en général, les flèches que prennent les pièces sous les charges d'épreuve, mais les flèches sont les résultantes complexes des déformations de toutes les sections, et avant d'en aborder l'étude, il est nécessaire d'étudier d'abord la déformation qui se produit dans une tranche d'épaisseur infiniment petite, comprise entre deux sections AB-CD (fig. 3) faites perpendiculairement à l'axe de la pièce fléchie.

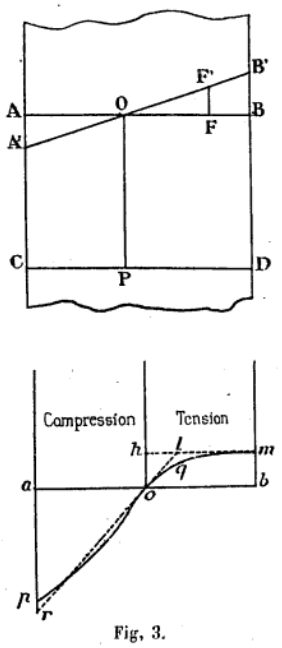


Fig. 3.

Si, pour simplifier, on considère comme fixe la section CD, on pourra représenter la déformation par une rotation de la section AB qui viendra en A'B'. La fibre OP conservera seule sa longueur primitive, et les raccourcissements, d'une part, les allongements, de l'autre, seront représentés en grandeur absolue par les portions d'ordonnées comprises dans les triangles AOA' et BOB'.

Les allongements et raccourcissements rapportés à l'unité de longueur seront les quotients de ces valeurs absolues par la distance OP qui séparait primitivement les deux sections.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La courbe de déformation du béton par traction et compression étant supposée connue, on peut déterminer immédiatement la tension ou pression qui se produit dans chacune des fibres puisqu'on en connaît l'allongement ou le raccourcissement. En portant ces tensions et pressions en ordonnées à partir de la ligne *ab*, on obtiendra une courbe qui sera la reproduction, à une certaine échelle, d'une portion de la courbe de déformation du mortier, puisque l'allongement ou le raccourcissement de chaque fibre est proportionnel à sa distance à l'axe neutre O.

On déterminera de même, au moyen de la courbe de déformation du métal, la tension des armatures dont l'allongement est FF'.

Les tensions ou pressions de toutes les fibres de mortier et de métal étant ainsi connues, le moment de flexion qu'elles produisent, peut être déterminé graphiquement au moyen d'opérations très simples.

Il est donc facile de déterminer les efforts qui se produisent dans une section d'une pièce en béton armé dont on connaît les déformations, mais le problème qui se pose pour les épreuves, est précisément l'inverse de celui-là, puisqu'il s'agit de calculer les déformations qui doivent se produire dans une section soumise à des efforts déterminés, si la construction est bien faite.

Il est facile de se rendre compte qu'on ne peut le résoudre qu'avec beaucoup de peine en cherchant par tâtonnements une position de l'axe neutre et une inclinaison de la ligne A'B', telles que les efforts développés satisfassent à cette double condition, que la somme des tensions soit égale à celle des pressions et que le moment produit par le couple des tensions et pressions soit égal au moment d'épreuve.

MÉTHODE APPROXIMATIVE DE CALCUL DE LA DÉFORMATION NON ÉLASTIQUE.

Telle est la solution rigoureuse, mais il serait vain de tenir à une exactitude absolue dans les calculs quand il s'agit de bétons dont les propriétés physiques varient dans une large mesure suivant diverses circonstances, même lorsqu'on emploie les mêmes dosages et les mêmes ouvriers. On peut donc, sans inconvénient réel, substituer à la courbe de déformation vraie *poqm* le contour polygonal *rlm*(1) qui en diffère très peu et qui permet de relier par des équations simples les variables du problème, dans le cas ordinaire des pièces armées seulement du côté tendu qui va être étudié le premier.

On désignera par :

h et *e*, la hauteur et l'épaisseur de la section transversale du prisme.

M, le moment de flexion auquel est soumise la section dont on veut déterminer la déformation;

p, le pourcentage du métal, c'est-à-dire la proportion des sections des armatures et du béton;

f, la tension des armatures en kilogrammes par millimètre carré.

t, la tension en kilogrammes par centimètre carré que le béton acquiert quand sa limite d'élasticité est dépassée et qui reste presque constante jusqu'à la rupture quand la déformation dépasse cette limite dans une mesure quelconque;

c, la compression maximum en kilogrammes par centimètre carré que le béton supporte dans ses fibres les plus raccourcies;

K, le quotient $100\,\frac{E^b}{E^f}$, E^b et E^f étant les coefficients d'élasticité du béton comprimé et du fer tendu. Le multiplicateur 100 est la conséquence de l'adoption, pour les tensions et pressions, des unités usuelles de section qui sont le millimètre carré pour le métal et le centimètre carré pour le béton;

hx, la distance de l'axe neutre à la face du prisme qui supporte la plus forte tension;

hu, la distance de l'axe des armatures à la même face.

1. Dans une étude publiée dans le *Génie civil* et visant un objet autre que le calcul des déformations, nous avions substitué à la courbe le contour *rohm*; celui que nous adoptons ici, est évidemment plus près de la réalité.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En exprimant que la somme des tensions du métal et du béton est égale à la somme des pressions du béton, on obtient l'équation suivante :

$$tx - \frac{t^2}{2c}(1-x) + 100\,pf = \frac{c}{2}(1-x). \qquad (1)$$

Le rapport de la tension f des armatures à la compression des fibres extrêmes du béton c est égal au produit des rapports des distances à l'axe neutre par le rapport des coefficients d'élasticité des deux matériaux :

$$\frac{c}{f} = \mathrm{K}\frac{1-x}{x-u}. \qquad (2)$$

Le moment de flexion de la pièce armée qui est produit par les tensions des armatures et du béton tendu et par la compression du béton comprimé, est :

$$\mathrm{M} = eh^2\left[\frac{tx^2}{2} - \frac{t^2}{6c^2}(1-x)^2 + 100fp(x-u) + \frac{c}{3}(1-x)^2\right]. \qquad (3)$$

Les essais auxquels on a dû soumettre le métal et le béton employés dans la construction qu'on veut éprouver, ont donné les valeurs de t et de K; il ne reste donc que trois inconnues : x, f et c, et les trois équations permettent de déterminer leurs valeurs qui correspondent à chaque valeur du moment d'épreuve M. Mais la résolution directe des équations serait difficile et on arrive facilement au même résultat pratique en procédant de la manière suivante :

On élimine f entre les équations (1) et (2) et on obtient :

$$tx - \frac{t^2}{2c}(1-x) + \frac{100pc}{\mathrm{K}}\frac{x-u}{1-x} = \frac{c}{2}(1-x). \qquad (4)$$

Cette équation contient trois variables c, K et x. Si l'on choisit arbitrairement la valeur de la compression c du béton, la courbe de déformation du béton type donnera la valeur de K, correspondante à cette pression, et en introduisant ces valeurs de c et K dans l'équation (4), on en tirera la valeur correspondante de x.

En remplaçant c, K, x, par ces valeurs dans les équations (2) et (3), on obtiendra les valeurs correspondantes de f et de M.

En donnant ainsi successivement à c un certain nombre de valeurs convenablement choisies dans les limites de celles qui peuvent se produire dans les épreuves, on obtiendra autant de groupes de valeurs de c, f, M, dont chacune satisfera aux équations et qui caractérisera, par conséquent, l'un des états possibles d'équilibre de la poutre considérée.

S'il s'agissait de calculer la fatigue de la poutre, ce sont bien là les éléments qu'on aurait besoin de connaître, mais il s'agit ici de calculer, en vue des épreuves, non par les efforts f et c, mais les déformations correspondantes qui doivent se produire si la construction est établie dans des conditions normales.

L'allongement a du métal est égal à $\frac{f}{\mathrm{E}^f}$ et le raccourcissement des fibres les plus comprimées du béton r est égal à $\frac{c}{\mathrm{E}^b}$, E^f et E^b étant les coefficients d'élasticité du fer et du béton.

On connaît le coefficient d'élasticité du fer; quant à celui du béton qui convient à chaque valeur de c, il est égal au coefficient d'élasticité du fer multiplié par la valeur de K correspondante à celle de c qu'on a déjà eu à déterminer pour l'introduire dans l'équation (4).

Pour que les résultats ainsi obtenus s'appliquent à tous les prismes ayant le même pourcentage des armatures p, quelles qu'en soient l'épaisseur e et la hauteur h, il suffit de considérer, au lieu des moments totaux M, les moments unitaires $m = \frac{\mathrm{M}}{eh^2}$.

Les groupes de valeurs de M, f, c, permettront donc de calculer les groupes de valeurs de m, a, r, dont chacun se réalisera dans la pièce à éprouver, quand la charge d'épreuve lui imposera le moment absolu M et le moment m rapporté à une section carrée de 1 centimètre de côté.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par interpolation numérique, on pourra facilement en déduire les déformations a, r, qui se produiront sous l'action d'un moment unitaire quelconque m, compris entre les valeurs extrêmes qui figurent dans les groupes. On arrivera plus facilement encore au même résultat, en construisant deux courbes qui auront pour abscisses les moments unitaires m et pour ordonnées les valeurs correspondantes des allongements du fer a dans l'une et les raccourcissements du béton r dans l'autre (fig. 4 et 5).

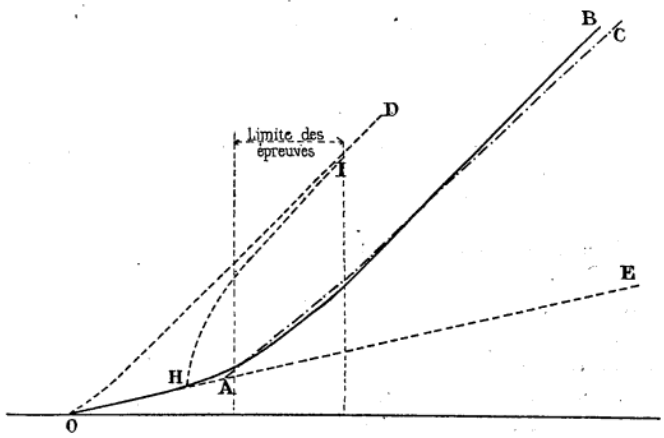


Fig. 4.

Courbes des allongements des armatures.

Abscisse. — Moments unitaires à l'échelle de 3mm,33 par kilogrammètre.
Ordonnées. — Allongements à l'échelle de 40 millimètres par millième.
La ligne C représente les allongements calculés par les formules 1 à 4. Les lignes OE, OD, OHI représentent les résultats des trois hypothèses faites par divers auteurs et dont il sera question plus loin.
La ligne pleine OB représente les déformations réelles du prisme 34. (Voir ci-après.)

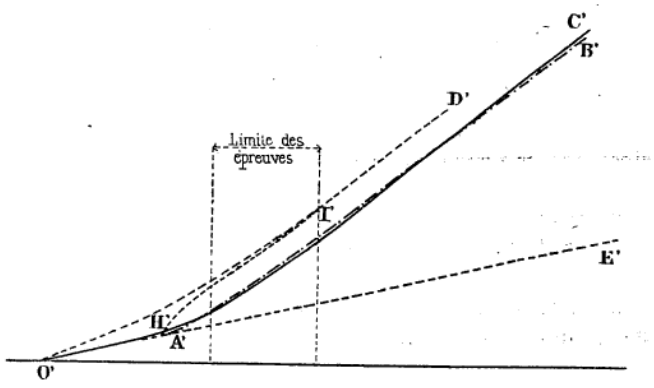


Fig. 5.

Courbes des raccourcissements maxima du béton.

Mêmes données, sauf que les ordonnées représentent les raccourcissements.

CALCUL DE LA DÉFORMATION PENDANT LA PÉRIODE ÉLASTIQUE

Si l'on se reporte à l'hypothèse qui a servi de base à l'établissement des formules 1 à 4, on reconnaîtra qu'elles ne sont applicables qu'à partir du moment où l'élasticité est altérée dans les fibres extrêmes du béton tendu.

Pour les charges plus faibles, le coefficient d'élasticité conserve sa valeur normale et il est très facile de calculer les déformations en appliquant les formules usuelles et en tenant compte, pour le calcul des moments d'inertie, de la différence des coefficients d'élasticité parfaite du métal et du béton.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

COURBES COMPLÈTES DE DÉFORMATION

En complétant, ainsi pour la période élastique, les courbes que les équations 1 à 4 ont données pour la période où l'élasticité du béton tendu est altérée, on obtiendra les courbes tracées en pointillé interrompu OAC, O'A'C' (fig. 4 et 5) qui présenteront forcément des jarrets comme la ligne *rlm* (fig. 3) qui a servi de base à l'établissement des formules. Il est évident qu'on se rapprocherait de la réalité en raccordant par des courbes les deux côtés du jarret, de même que la courbe de déformation du béton tendu raccorde les deux lignes *rl* et *lm*.

Finalement on obtiendra ainsi les deux courbes complètes OAC, O'A'C' représentant, l'une les allongements des armatures, l'autre les raccourcissements maxima du béton qui se produiront dans une poutre armée au pourcentage p quand elle sera soumise à un moment de flexion unitaire m, c'est-à-dire à un moment de flexion totale $M = meh^2$, e étant son épaisseur et h sa hauteur.

On construira des courbes analogues pour un certain nombre de valeurs du pourcentage p et on aura ainsi tous les éléments nécessaires pour déterminer en un instant, par interpolation numérique ou graphique, les déformations d'une pièce quelconque formée du métal et du béton présentant les qualités caractéristiques (E', K et t) en vue desquelles les calculs auront été faits.

En deux jours, un calculateur peut établir ainsi les tables ou graphiques nécessaires pour toutes les pièces armées du côté tendu qui pourront exister dans une construction où l'on n'emploiera qu'une qualité de métal et de béton.

COMPARAISON DES DÉFORMATIONS RÉELLES ET DES DÉFORMATIONS CALCULÉES

Il importe de rechercher quel degré de confiance mérite la méthode qui vient d'être indiquée et le seul critérium décisif paraît être la comparaison pour un prisme déterminé, des déformations qu'elle fait prévoir et de celles qui ont été réellement observées.

On prendra comme exemple le prisme n° 34 dont l'essai a fait l'objet de la communication du 12 décembre 1898 à l'Académie des Sciences. On pourra trouver dans le compte rendu de la séance les éléments des vérifications qu'on jugera utiles.

Le prisme en question avait une section carrée de 60 millimètres de côté et une longueur de 60 centimètres. Il était formé de mortier dosé à 433 kilogrammes de ciment de Portland par mètre cube de sable. Les armatures consistaient en trois fils de fer non recuits de de 4^{mm}, 25 de diamètre.

Les deux extrémités du prisme étaient prises dans des encastrements par l'intermédiaire desquels la charge agissait parallèlement à l'axe du prisme; par suite, le moment de flexion était constant et l'effort tranchant était nul dans toute la partie du prisme comprise entre les encastrements, et c'est là que les déformations ont été mesurées.

Le prisme a été conservé dans l'eau pendant 210 jours et a été essayé 3 jours après émersion.

Les déformations observées dans l'essai du prisme 34 sont représentées en traits pleins dans les figures 4 et 5 et les déformations calculées au moyen des formules 1 à 4 y sont indiquées en pointillé interrompu. Dans chaque épure, les deux courbes se superposent presque et il est naturel de se demander si cette remarquable concordance ne vient pas de ce que les valeurs de K et de t qui ont été introduites dans les formules, ont été déterminées par une méthode qui devait précisément conduire à cet accord. Il n'en est rien.

Le coefficient d'élasticité du fer E' avait été déterminé par l'essai de traction d'un fil identique à celui des armatures.

Les expériences faites sur le prisme 34 avaient déterminé la position de l'axe neutre; elles donnaient donc, pour chaque charge, la section de la partie comprimée du prisme et permettaient de calculer les compressions du mortier par centimètre carré avec une marge d'incertitude qui serait restée très étroite quand même on aurait commis des erreurs notables dans l'appréciation de la tension t que produisait le béton tendu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Or, une fois ces pressions connues, les valeurs de K sont déterminées par les valeurs correspondantes des raccourcissements du béton qui ont été mesurées directement.

Quant à la tension t elle-même que le mortier prend et conserve presque sans changement dès que la limite d'élasticité est dépassée, elle a été contrôlée par des expériences directes faites sur les baguettes détachées des armatures comme il a été expliqué plus haut.

Il est donc établi que, pour le prisme 34, les formules 1 à 4 ont permis de calculer les déformations avec une exactitude très satisfaisante en y introduisant les caractéristiques réelles du mortier et du fer dont il était formé.

RÉSULTATS DES HYPOTHÈSES ADMISES PAR DIVERS AUTEURS

Il importe de mettre en regard les résultats auxquels conduisent les trois hypothèses qui seules, à notre connaissance, avaient été faites jusqu'ici, pour expliquer la résistance et la déformation des pièces en béton armé.

La première de ces hypothèses consiste à admettre que le béton conserve son coefficient d'élasticité pendant toute la durée de l'épreuve. Cette hypothèse, quelque invraisemblable qu'elle soit, est cependant la base nécessaire des méthodes adoptées par certains ingénieurs qui admettent que les armatures peuvent être remplacées dans les calculs par une section de béton égale à la leur, multipliée par le rapport inverse des coefficients d'élasticité parfaite du fer et du béton. Elle conduit à prévoir comme déformations les ordonnées des deux lignes droites OE, O'E' (fig. 4 et 5). Elles diffèrent beaucoup de celles qui se produisen réellement, sauf sous faibles charges.

La deuxième hypothèse est à l'extrême opposée de la précédente; elle consiste à supposer que le béton tendu ne joue aucun rôle dans la résistance des pièces armées. Elle a été admise jusqu'ici par le plus grand nombre des praticiens et des ingénieurs et j'ai expliqué ailleurs comment il se fait que, bien qu'inexacte, elle donne cependant des résultats acceptables au point de vue du calcul des dimensions des constructions en béton armé. Il en est tout autrement pour le calcul des déformations. Les valeurs auxquelles elle conduit s'obtiennent au moyen des équations 1 à 4 en y faisant $t = o$. Elles sont représentées par les ordonnées des lignes OD, O'D' (fig. 4 et 5).

La troisième hypothèse paraissait plausible avant la communication faite le 12 décembre 1898 à l'Académie des sciences. Elle consiste à admettre que le béton reste parfaitement élastique tant que son allongement ne dépasse pas la valeur qui produit la rupture dans les essais de traction simple du béton non armé, ce qui est exact, et, ce qui ne l'est pas, qu'il se brise dès que cette limite est dépassée. Il en résulterait que dans une section soumise à un moment de flexion croissant, la fissure commencerait par les fibres extrêmes lorsqu'elles subiraient l'allongement connu de rupture et qu'au fur et à mesure de l'augmentation de la charge, la fissure s'accroîtrait progressivement jusqu'à se rapprocher très près de l'axe neutre.

Si les choses se passaient réellement ainsi, les déformations seraient représentées pendant la période d'élasticité par les ordonnées des lignes OE, O'E'; elles augmenteraient ensuite brusquement par suite de la rupture des fibres tendues dont la résistance tendrait vers zéro. Elles seraient donc représentées par les lignes brisées OHID, O'H'I'D' qui son asymptotes aux lignes OD, O'D'.

Bien qu'au point de vue théorique, il soit intéressant de voir comment les diverses hypothèses s'accordent avec les faits observés jusqu'à la rupture, il est surtout utile d'étudier les écarts qui se produisent dans les limites de charge qu'on peut avoir à réaliser dans les épreuves réelles.

Ces limites sont tracées sur les épures et les différences que présentent, dans leur intervalle, les déformations calculées et les observations observées, sont indiquées ci-dessous en centièmes de ces dernières.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

	Allongements du fer.	Raccourcissements du béton
Différence entre la réalité et les résultats des formules 1 à 4. . .	5 %	5 %
— — de la 1re hypothèse. . .	45 %	50 %
— — de la 2e — . . .	110 %	25 %
— — de la 3e — . . .	100 %	20 %.

Ces chiffres motivent diverses observations.

On remarque d'abord que toutes les hypothèses faites jusqu'ici conduisent à prévoir des déformations très différentes de la réalité, tandis qu'on obtient une approximation fort satisfaisante en appliquant les formules 1 à 4. Il fallait s'y attendre, et c'est faire une véritable tautologie de dire que, pour calculer les déformations du béton armé, il faut tenir compte des lois de la déformation des deux éléments dont il est composé, lois qui n'étaient pas connues précédemment.

On remarquera que, dans les limites des épreuves pratiques, la troisième hypothèse donne des résultats presque aussi médiocres que la seconde. Cela vient de ce qu'elle ne serre la vérité de plus près que dans la période d'élasticité parfaite ou pour des charges qui ne la dépassent guère, tandis que les épreuves pratiques comportent l'emploi de charges beaucoup plus fortes.

La seconde et la troisième hypothèse donnent des résultats beaucoup moins inexacts pour la déformation du béton que pour celle des armatures. Le fait est facile à comprendre. En négligeant la résistance du béton tendu, on est conduit à attribuer au fer la totalité des tensions, alors qu'en réalité, il n'en supporte qu'une partie. On prévoit donc pour les armatures, des tensions et par suite, des déformations beaucoup trop fortes. Il en est tout autrement du béton comprimé auquel, dans toutes les hypothèses, on doit attribuer la totalité des pressions nécessaires pour produire le couple de flexion. Si la pression maximum par centimètre carré est évaluée trop haut dans la seconde hypothèse, c'est donc seulement parce que celle-ci conduit à supposer l'axe neutre trop loin des armatures. L'aire du béton comprimé est ainsi évaluée trop bas et, par suite, sa pression maximum par centimètre carré est exagérée.

Il y a lieu de faire remarquer que les erreurs résultant de l'emploi de la deuxième hypothèse pour la prévision des déformations en vue de l'épreuve des constructions armées peuvent être tantôt moindres, tantôt plus fortes que celles qu'on constate dans l'essai du prisme 34. Elles dépendent des circonstances suivantes :

INFLUENCE DU POURCENTAGE DU FER ET DE LA QUALITÉ DU BÉTON

Les erreurs provenant de la seconde hypothèse sont la conséquence du rôle que joue le béton tendu; elles doivent, par conséquent, augmenter en même temps que l'importance relative du béton par rapport aux armatures, et le prisme n° 34 était dans des conditions favorables à ce point de vue. Il faut remarquer, en effet, que le pourcentage des armatures de 0,0112 est plus faible que les valeurs adoptées généralement, et que, par suite, l'importance relative du mortier en est augmentée. Elle l'est également par la qualité du mortier dont la fabrication a été très soignée et qui, malgré un faible dosage de ciment, a fourni une résistance à la traction de 21 kilos, supérieure de 30 %, au moins, à celle que donnent les bétons armés qu'on emploie généralement dans les bâtiments.

Pour les constructions courantes conservées dans l'air, la seconde hypothèse doit donc, pour ces motifs, conduire à des erreurs moindres que celles observées pour le prisme 34.

En revanche, si l'on emploie pour les travaux hydrauliques des bétons riches comme on devra le faire pour en assurer l'imperméabilité et la durée, on obtiendra des bétons encore plus résistants que le mortier du prisme n° 34 et la différence des résultats donnés par les diverses formules en sera augmentée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

INFLUENCE DU GLISSEMENT LONGITUDINAL DES ARMATURES

L'essai du prisme n° 34 diffère de la plupart des épreuves pratiques par ce point encore que les efforts produisant le moment de flexion étaient appliqués près des extrémités et que, par suite, il n'y avait pas d'effort tranchant dans la partie centrale où les déformations ont été observées. Or, l'effort tranchant produit le glissement des armatures dans le mortier qui les enveloppe et augmente les déformations. Dans quelle mesure, nous ne pouvons encore le dire, et il faudra de nouvelles expériences pour déterminer les corrections nécessaires pour appliquer aux sections qui supportent des efforts tranchants, les formules que nous avons établies en admettant la conservation des sections planes et, par suite, l'absence de tout effort tranchant.

INFLUENCE DU MILIEU DANS LEQUEL LE BÉTON EST PLACÉ

Le prisme n° 34 a été conservé dans l'eau pendant 210 jours et n'en a été tiré que 3 jours avant l'essai, tandis que les constructions établies à l'air sont essayées après une dessiccation presque complète. Pour expliquer les différences importantes qui doivent en résulter pour les déformations, il est nécessaire de résumer brièvement la communication que nous avons faite le 18 septembre 1899 à l'Académie des sciences.

On sait que suivant qu'ils ont fait prise et qu'ils sont restés dans l'air ou dans l'eau, les mortiers et les bétons subissent des retraits ou, au contraire, des dilatations qui atteignent 2 millimètres par mètre pour les pâtes de ciment de Portland pur et qui diminuent avec la proportion de ciment mélangée au sable et au gravier, sans descendre notablement au-dessous de $0^{mm},40$ pour les bétons les plus maigres que l'on emploie dans les travaux.

Les armatures métalliques noyées dans le mortier ou le béton tendent à conserver leur longueur primitive, mais elles sont liées à la matière qui les entoure et elles y adhèrent fortement. Il s'établit un état d'équilibre complexe où les glissements longitudinaux jouent un rôle important, et dans lequel il se produit forcément une compression des armatures et une tension du fer si le mortier a été conservé dans l'air, et, au contraire, une tension des armatures et une compressien du béton, s'il a été conservé dans l'eau.

Il y a lieu de rechercher l'influence que ces efforts intérieurs exercent sur la déformation des pièces armées.

Considérons deux prismes conservés, l'un dans l'air et l'autre dans l'eau, qui, sauf cette différence, soient dans des conditions absolument identiques, c'est-à-dire qui aient même pourcentage des armatures, mêmes coefficients d'élasticité, et même résistance du béton.

Soumettons ces deux prismes à des charges identiques. Tant que la limite d'élasticité du béton ne sera pas dépassée, les déformations seront les mêmes pour les deux prismes, parce que si les efforts absolus qui se développent dans le fer et le béton sont différents, leurs variations seront identiques, et dans la période d'élasticité les déformations ne dépendent que des variations des efforts et non de leurs valeurs absolues.

Lorsque l'élasticité du béton sera altérée, les déformations des deux prismes seront, au contraire, très différentes. Pour le mettre plus facilement en lumière, nous négligerons la période intermédiaire pour considérer celle où l'allongement des fibres tendues du béton dépasse partout l'allongement élastique, sauf dans une fraction pratiquement négligeable des fibres les plus rapprochées de l'axe neutre.

Si, pour simplifier, on néglige provisoirement aussi la légère différence des positions de l'axe neutre dans les deux prismes, sauf à y revenir tout à l'heure, on peut raisonner ainsi : Soit M le moment auquel est soumis chacun des deux prismes et μ le moment résistant que produisent les tensions des fibres allongées du béton et une part égale à leur somme des pressions des fibres raccourcies qui complètent le couple. μ aura la même valeur dans les deux prismes, puisque l'allongement élastique étant, par hypothèse, dépassé, les fibres tendues produisent dans l'un et l'autre prisme la même tension t. Il faudra donc, pour l'équilibre, que dans les deux prismes les armatures produisent un même moment $M - \mu$, et, par suite, qu'elles prennent un même allongement absolu a. Or, pour le prisme conservé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans l'air, les armatures influencées par le retrait du béton subissaient, avant la mise en charge, un raccourcissement r, tandis que dans le prisme conservé sous l'eau, elles avaient éprouvé une dilatation d. Par conséquent, pour prendre le même allongement absolu a, les armatures du prisme à l'air doivent s'allonger de $a+r$, tandis que celles du prisme à l'eau ne s'allongent que de $a-d$ (r et d sont généralement compris entre $0^{mm},10$ et $0^{mm},20$).

Il n'en est pas tout à fait ainsi à cause du déplacement de l'axe neutre qui s'éloigne d'autant plus des armatures qu'elles s'allongent davantage. Il en résulte pour les prismes conservés à l'air une augmentation du bras de levier du couple résistant de flexion, et, par suite, une diminution de la tension nécessaire pour produire le moment M et l'allongement correspondant des armatures. C'est évidemment l'inverse qui a lieu pour les prismes conservés dans l'eau, de sorte qu'en réalité les variations de longueur que l'épreuve impose aux armatures, sont un peu inférieures à $a+r$ pour les premiers et supérieures à $a-d$ pour les seconds.

Mais ce qu'on peut mesurer sans détériorer les poutres par des entailles dans le béton, ce sont les variations de longueur, non des armatures invisibles, mais du béton qui les cache. Or, le glissement longitudinal que l'effort tranchant impose aux armatures par rapport au béton est de sens opposé à celui que le retrait produit dans les pièces conservées à l'air, tandis qu'il est de même sens que celui qui résulte de la dilatation des prismes conservés dans l'eau. Il y a là une nouvelle cause d'augmentation relative des déformations du béton et, par suite, des flèches dans les pièces conservées à l'air.

On comprend par ce qui précède que les armatures transversales qui diminuent les glissements doivent, par suite, réduire les déformations des constructions en béton armé.

On voit de combien d'éléments dépend la déformation des prismes armés, et quelles études nombreuses il reste à faire pour déterminer exactement le rôle et l'importance de chacun. Toutefois les notions acquises semblent suffisantes pour obtenir des résultats pratiques à la condition de faire, sur chaque chantier, quelques épreuves de pièces normalement exécutées sous les yeux des ingénieurs avec les matériaux et les types d'armatures employés dans la construction. Des résultats de ces épreuves, on déduirait les modifications à apporter aux chiffres donnés par les formules basées sur l'hypothèse de la conservation des sections planes et de l'absence d'efforts intérieurs préalables, pour que leurs résultats concordassent avec les déformations réelles des pièces exécutées avec les matériaux et le soin que l'on croirait devoir exiger des constructeurs.

RENSEIGNEMENTS DONNÉS PAR LES ÉPREUVES

Quoi qu'il en soit, on va supposer qu'en employant concurrement les calculs théoriques et les données de l'expérience, on soit arrivé à déterminer les formes qu'auraient les courbes de déformation d'une pièce déterminée, si elle était exécutée dans des conditions normales, et on cherchera quels renseignements on peut tirer de la comparaison de ces courbes avec celles que donnera réellement la mesure des déformations dans les sections transversales effectuée au moyen d'appareils convenablement placés de part et d'autre de l'axe neutre.

Les malfaçons qui peuvent se produire dans les constructions armées sont nombreuses. On peut d'abord employer de mauvais sables ou des ciments inférieurs, et il en résulte une diminution de toutes les qualités des bétons.

La proportion d'eau employée dans le gâchage du béton exerce une influence considérable sur son coefficient d'élasticité qui peut descendre à $1{,}50\times10^9$ avec des matériaux qui permettraient d'obtenir $2{,}50\times10^9$ en employant la proportion d'eau la plus convenable. La résistance diminue aussi, mais dans une proportion moindre que le coefficient d'élasticité, quand il y a excès d'eau dans le béton. Le pilonnage n'est pas moins important et son insuffisance paraît réduire, dans une mesure à peu près égale, la résistance et le coefficient d'élasticité.

Il est à craindre que les entrepreneurs réduisent le dosage du ciment au-dessous du chiffre prescrit par les devis. S'il en était ainsi, les résistances à la tension et à la compression seraient diminuées ainsi que la limite d'élasticité, mais on sait par de nombreuses expériences que le coefficient d'élasticité serait réduit dans une moindre mesure.

Il résulte de ce qui précède que les diverses malfaçons influent d'une manière différente

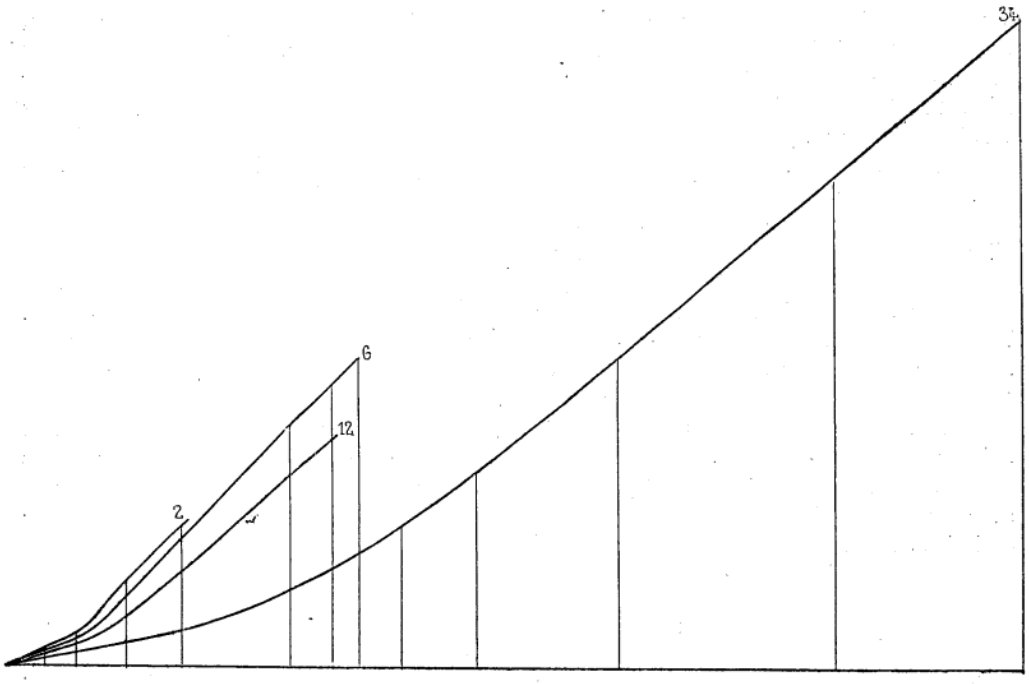
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur les résistances et sur les limites et coefficients d'élasticité. Or l'étude des courbes de déformation permet de distinguer les altérations diverses qui caractérisent les propriétés du béton.

En effet, pendant la période d'élasticité parfaite qui se produit sous l'action des faibles charges, les déformations dépendent exclusivement du coefficient d'élasticité. On aura donc des indications sur sa valeur en comparant les inclinaisons sur l'horizontale prévues et réellement observées des lignes OH, O'H' (fig. 4 et 5) lesquelles représentent les déformations élastiques.

Quant à la limite d'élasticité, elle est proportionnelle aux abscisses des points H, H' où l'inclinaison des courbes change presque brusquement.

Fig. 6.



Prisme 2 300^{k} de ciment, 0$^{m^3}$ 500 sable, 0$^{m^3}$ 500 gravier. Excès d'eau. ____ 7 mois dans l'air.
— d° — 6 ____ d° ____ d° ____ Insuffisance d'eau : ____ d° ____.
— d° — 12 ____ d° ____ d° ____ Gachage normal : ____ d° ____.
— d° — 34 433^{k} de ciment, 1$^{m^3}$ de sable. — Gachage normal : 7 mois dans l'eau

Échelles { Abscisses — 2$^{m/m}$ par kilogrammètre de moment absolu.
Ordonnées 50$^{m/m}$ par millième d'allongement.

Les abscisses des lignes OD, O'D' représentent, on l'a vu plus haut, les déformations qui auraient lieu si le béton ne produisait pas de tensions; les portions d'abscisses comprises entre ces lignes et les courbes de déformation réellement observées OB, O'B' sont donc presque proportionnelles aux tensions réelles que produit le béton et qui sont presque identiques à sa résistance à la rupture par traction, on l'a vu plus haut.

Des courbes de déformation et de la variation des positions de l'axe neutre, on peut tirer aussi des indications relatives au glissement des armatures dans le béton, mais l'étude de cette question entraînerait trop loin.

Il serait plus long encore de préciser l'influence qu'exercent sur la fatigue des divers éléments des pièces armées les causes qui modifient leurs déformations.

Nous nous bornons à donner une idée des différences qui se produisent dans la déformation

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des pièces armées en reproduisant l'épure des allongements du béton ou mortier de la face tendue dans quatre prismes constitués comme le prisme 34 (qui en fait partie) c'est-à-dire ayant une section carrée de 60 millimètres et armés de trois fils de $4^{mm},25$ de diamètre.

Les trois premiers N^{os} 2, 6 et 12 renfermaient 300 kilos de ciment par mètre cube d'un mélange de sable et petit gravier, c'est le dosage qu'emploie M. Hennebique. Le dernier N° 34 renfermait 433 kilos de ciment par mètre cube de sable pur, ce qui nous avait semblé équivalent, mais peut-être ce mélange est-il un peu plus riche.

Les trois premiers prismes différaient, les uns des autres, en ceci seulement qu'on avait volontairement réduit ou augmenté à l'excès la quantité d'eau de gâchage dans les deux premiers et que le troisième avait été fait dans les conditions normales. Il n'y a pas lieu de tenir compte du point où les essais ont été arrêtés pour diverses raisons, mais on remarque que les déformations ont été bien plus faibles dans le prisme normal que dans ceux où la proportion d'eau était mal choisie.

C'est entre le prisme 34 et les autres que la différence de déformation est énorme. Cette différence vient, dans une certaine proportion, de la différence de coefficients d'élasticité du mortier ou béton mais bien plus encore de ce fait que l'on a conservé les trois premiers prismes dans l'air et le dernier dans l'eau.

Ces exemples suffisent pour montrer que les différences que les épreuves révéleront entre les pièces en béton armé, seront d'un ordre de grandeur tel qu'elles n'exigeront pas des moyens de mesure de grande précision.

Ce n'est point ici le lieu de traiter les questions diverses qu'ils soulèvent.

DÉFORMATIONS DES PIÈCES A DOUBLE ARMATURE

Dans tout ce qui précède, on a étudié les pièces armées seulement du côté qui travaille par traction et on emploie quelquefois aussi des armatures placées dans les fibres comprimées. Leurs déformations peuvent être déterminées facilement au moyen des graphiques établis pour les pièces à armature unique.

Soit AB (fig. 7) la section transversale d'un prisme muni d'une armature unique F. Quand cette section sera soumise à un moment unitaire d'épreuve m, l'axe neutre aura une position O que les équations 1 à 4 permettent de définir.

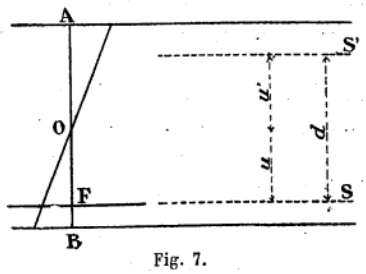


Fig. 7.

Si l'on ajoute à ce prisme une section supplémentaire S d'armatures tendues et une section S' d'armatures comprimées et si l'on désigne par u et u' leurs distances à l'axe neutre, les efforts totaux de sens contraire produits par ces armatures nouvelles seront égaux entre eux pourvu que les sections satisfassent à l'égalité $Su = S'u'$, car les efforts qu'elles supporteront par millimètre carré, seront proportionnels à leurs déformations et, par suite, à leurs distances à l'axe neutre u et u'.

L'équilibre que la pièce à armature simple prenait sous le moment m, ne sera donc pas troublé, si, en même temps qu'on ajoute les armatures nouvelles, on augmente le moment des forces extérieures d'une quantité égale au moment résistant que donne la tension de S et la pression égale de S'.

Or la valeur commune de ces forces est facile à déterminer car l'armature supplémentaire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tendue étant placée à la même distance de l'axe neutre que l'armature simple du prisme primitif, subit le même allongement et, par suite, la même tension unitaire f que donnent soit les formules 1 à 4 soit les graphiques ou barèmes établis au moyen de ces formules.

Le moment résistant supplémentaire est donc $Sf\ (u+u') = Sfd$, d étant la distance des armatures.

Par suite, on ne change rien aux efforts unitaires ni aux déformations qui se produisent dans l'une quelconque des fibres de métal et de béton d'une pièce à armature simple si l'on y ajoute des armatures doubles dont les sections soient dans le rapport $\frac{u}{u'}$ (qui résulte directement de la position de l'axe neutre, c'est-à-dire de la valeur de x donnée par les formules 1 à 4) et si l'on augmente, en même temps, le moment de flexion de Sfd.

Par suite, pour que les graphiques ou barèmes faits pour les poutres à armatures simples donnent les indications nécessaires pour les poutres munies d'armatures doubles de sections quelconques, il suffit d'y ajouter une table de concordance qui peut être faite en quelques instants.

Soit, en effet, γ la valeur que le rapport $\frac{u}{u'}$ prend sous la charge d'épreuve pour une poutre munie d'une armature simple de pourcentage p, les déformations calculées pour cette poutre seront exactement celles de toutes les poutres munies d'armatures doubles supplémentaires dont les sections seront dans le rapport γ pourvu qu'on leur impose une charge d'épreuve majorée de Sfd.

Supposons, par exemple, que pour les poutres simples au pourcentage de 0,02, la valeur de γ pour la charge d'épreuve soit de 1,10, leurs déformations seront aussi celles de toutes les poutres dont l'armature tendue aura une section $0{,}02 + x$ avec une armature comprimée de section $1{,}10\ x$, x ayant une valeur quelconque.

Ainsi le même barème s'appliquera à tous les prismes dont les armatures doubles auront des sections comprises dans les chiffres suivants ou interpolées :

Armatures tendues : 0,02 - 0,0250 - 0,030 - 0,0350 - 0,040.
— comprimées : 0,00 - 0,0055 - 0,011 - 0,0165 - 0,022.

Il est inutile de préciser les procédés très simples d'interpolation par lesquels, une fois ces tables de concordance établies pour les diverses valeurs de pourcentage des armatures simples, on fera le barème correspondant à une armature double ayant deux sections quelconques.

Il est entendu que les valeurs de m seront remplacées par $m + Sfd$.

Il est, à peine, nécessaire de dire que des moyens identiques à ceux qui viennent d'être indiqués pour le calcul des déformations des poutres à armatures doubles, permettront d'en calculer les résistances, mais il n'y a pas lieu d'en parler ici quelque grande qu'en soit l'importance.

CALCUL DES FLÈCHES

On vient de voir que les épreuves ayant pour base la mesure des allongements et des raccourcissements qui se produisent dans certaines sections des pièces fléchies, donnent facilement des renseignements utiles sur les qualités des matériaux dont elles sont formées et il est probable que c'est à elles qu'auront recours les ingénieurs qui posséderont les instruments de mesure nécessaires.

Les flèches des pièces chargées transversalement résultent des déformations d'un nombre infini de sections et il est évident, *a priori*, qu'on ne saurait, en observant ce phénomène complexe, obtenir facilement des résultats aussi précis que ceux de l'étude de la déformation des sections. Toutefois la mesure des flèches étant d'un usage presque général et n'exigeant pas l'emploi d'appareils spéciaux, il est vraisemblable qu'on continuera à l'employer souvent et il importe d'en parler rapidement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour calculer les flèches F des pièces armées, il est commode de se servir de la formule rarement employée $F = \int_0^l \frac{1}{\rho}(l-x)\,dx$ où l'on représente par ρ le rayon de courbure qu'a la pièce fléchie à la distance x du milieu et par l la demi-longueur de cette pièce. ρ est donné directement, en fonction de l'allongement a d'une fibre et du raccourcissement r d'une autre fibre distante de i de la première par la relation $\rho = \frac{i}{a+r}$

La flèche est donc $F = \int_0^l \frac{a+r}{i}(l-x)\,dx$, i et l sont des quantités connues et les valeurs de a et de r, sont données par les équations 1 à 4 en fonction des moments m auxquels les diverses sections de la pièce sont soumises.

L'intégration de cette formule est, sans doute, impossible, mais il serait aisé de trouver la valeur approximative de F en divisant la demi-longueur l en un nombre convenable de tronçons de longueur Δx et en calculant pour chacun la valeur de $\frac{a+r}{i}(l-x)$.

Le calcul serait facile, mais il faudrait le répéter pour chaque type de pièce et on ne voit pas de raisons pour accepter ces complications, alors qu'un seul barême qui peut être publié et comprendre les tables applicables aux diverses qualités de béton, donnera immédiatement les allongements et les raccourcissements qui doivent se produire dans une section transversale quelconque d'une pièce également quelconque exécutée avec des matériaux déterminés.

Il importe de faire remarquer que l'allure des courbes qui ont les flèches pour ordonnées et les moments pour abscisses, diffère notablement de celle des courbes des allongements ou des raccourcissements qui ont été étudiées dans cette note. Ces dernières sont presque rectilignes en dehors de la période élastique du béton tendu ou, du moins, elles ne s'incurvent que sous de très fortes charges capables d'altérer l'élasticité du béton comprimé si cette altération se produit avant que la poutre périsse pour une autre cause.

On comprend qu'il ne peut en être autrement puisque le moment résistant de flexion qui se produit après l'altération du béton tendu et avant celle du béton comprimé, est la somme de deux éléments dont la loi de variation est linéaire : le moment constant produit par le béton tendu et le moment proportionnel aux déformations que produisent le fer élastique et le béton comprimé tant que ce dernier est sensiblement élastique.

Dans de nombreuses expériences, nous avons toujours trouvé cette longue ligne presque droite.

Il ne peut en être ainsi dans la courbe des flèches parce qu'à mesure que la charge croît, la limite d'élasticité est dépassée dans de nouvelles sections, ce qui accélère l'accroissement des flèches. Aussi cet accroissement devient-il de plus en plus rapide jusqu'à la rupture.

LIMITES DES CHARGES D'ÉPREUVE

Il semble évident qu'il importe de ne pousser les épreuves que jusqu'au point nécessaire pour assurer la sécurité, et on pourra, sans doute, y employer des charges moindres si la comparaison des déformations normales et de celles qui se produiront réellement est faite, comme on l'a proposé plus haut, de manière à renseigner au moyen d'épreuves modérées sur le coefficient et la limite d'élasticité et sur la résistance à la traction du béton des pièces éprouvées. On sait, en outre, que la résistance à la compression est, à peu près, proportionnelle à la résistance à la traction et on voit, par suite, qu'une épreuve à faible charge suffira pour renseigner sur toutes les propriétés du béton employé.

PROJET DE RÉSOLUTION

Le rapporteur ne peut considérer les résultats de ses études personnelles comme assez certains pour servir de base aux résolutions d'un Congrès, il borne ses propositions aux points suivants :

A l'essai préalable des matériaux employés, il faut ajouter l'épreuve directe des constructions en béton armé pour avoir des garanties suffisantes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les épreuves n'auront toute leur utilité que si l'on détermine d'avance les déformations normales et si on leur compare les déformations observées.

La prévision des déformations normales doit être basée sur la connaissance des lois de la déformation du béton associé aux armatures et il semble qu'au-dessus de la limite d'élasticité, ces lois diffèrent de celles qui régissent les déformations des bétons non armés.

Les déformations des pièces travaillant par flexion paraissent être influencées par les efforts tranchants, par la nature du milieu dans lequel le béton a fait prise et a été conservé et par l'action des armatures transversales.

Il importe d'autant plus d'étudier ces questions que la résistance est intimement liée aux déformations.

Il est plus facile de calculer les allongements et les raccourcissements normaux qui doivent se produire dans une section déterminée que la flèche d'une pièce chargée transversalement qui est la résultante des déformations de toutes ses sections. La mesure des déformations locales mérite donc d'être recommandée et, tout au moins, de prendre place à côté de la mesure des flèches.

CONSIDÈRE.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE DES MATIÈRES

TOME II. — PREMIÈRE PARTIE

MÉTAUX

I. — ESSAIS MÉCANIQUES

Pages.

I. L'influence du temps et de la température sur les propriétés mécaniques et les essais des métaux. Communication présentée par M. André Le Chatelier, ingénieur en chef de la marine. 1

II. Le poinçonnage envisagé comme méthode d'essai. Communication présentée par M. Baclé. 27

III. Les essais de torsion. Note présentée par M. Rateau, ingénieur des mines. 65

IV. Recherches sur la résistance des matériaux enregistrée autographiquement au moyen de la machine à pendule autographe. Communication présentée par M. Robert H. Thurston, directeur du collège Sibley 67

V. Mémoire sur les épreuves à bille en acier. Communication présentée par M. J.-A. Brinell, ingénieur en chef; Fagersta, Westanfors (Suède).. 85

VI. Sur les définitions des fontes, fers et aciers. Communication présentée par M. Al. Pourcel. 95

VII. Sur les essais de trempe. Note présentée par M. Georges Charpy, ingénieur principal des usines Saint-Jacques, à Montluçon (Allier). 99

VIII. Cahiers des charges et méthodes d'essai internationales pour le fer et l'acier au point de vue de l'ingénieur américain. Rapport présenté. par William R. Webster, ingénieur-conseil et inspecteur d'usines. 105

IX. Examen des spécifications normales américaines proposées. Éprouvettes et méthodes d'essai du fer et de l'acier, avec une discussion des méthodes commerciales d'essais physiques et chimiques du fer et de l'acier aujourd'hui en usage aux États-Unis, et un examen critique de spécifications étrangères pour rails d'acier. Communication présentée par M. Albert Ladd Colby. 119

Appendice. — Cahier des charges normales américaines proposées pour acier et fer forgé. . . . 153

II. — ÉTUDES DES ESSAIS DE DIVERS MÉTAUX ET DE CERTAINES PIÈCES ASSEMBLÉES

X. Les aciers au nickel. Communication présentée par M. Ch.-Ed. Guillaume, physicien du bureau international des poids et mesures. 181

XI. Métallurgie et propriétés de l'acier au nickel. Communication présentée par M. D.-H. Browne de la Canadian Copper C° (Cleveland, Ohio), et M. H.-F.-J. Porter, de la Bethlehem Steel C° (South Bethlehem, Pa.). 205

XII. Effets relatifs de la corrosion sur le fer, l'acier doux et l'acier au nickel dans l'air, l'eau de mer et l'eau ordinaire Communication présentée par M. Howe. 229

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

XIII. Les entretoises de foyers de locomotives. Communication présentée par M. Le Blant, ingénieur civil des mines, chef du service des réceptions du matériel et de la traction des chemins de fer de l'Est. . . 267

XIV. Sur les essais des pièces en cuivre rouge et en laiton. Communication présentée par M. Émile Demenge, ingénieur-métallurgiste. 289

XV. Résultats des études expérimentales sur les ponts métalliques. Communication présentée par M. Lanna. 309

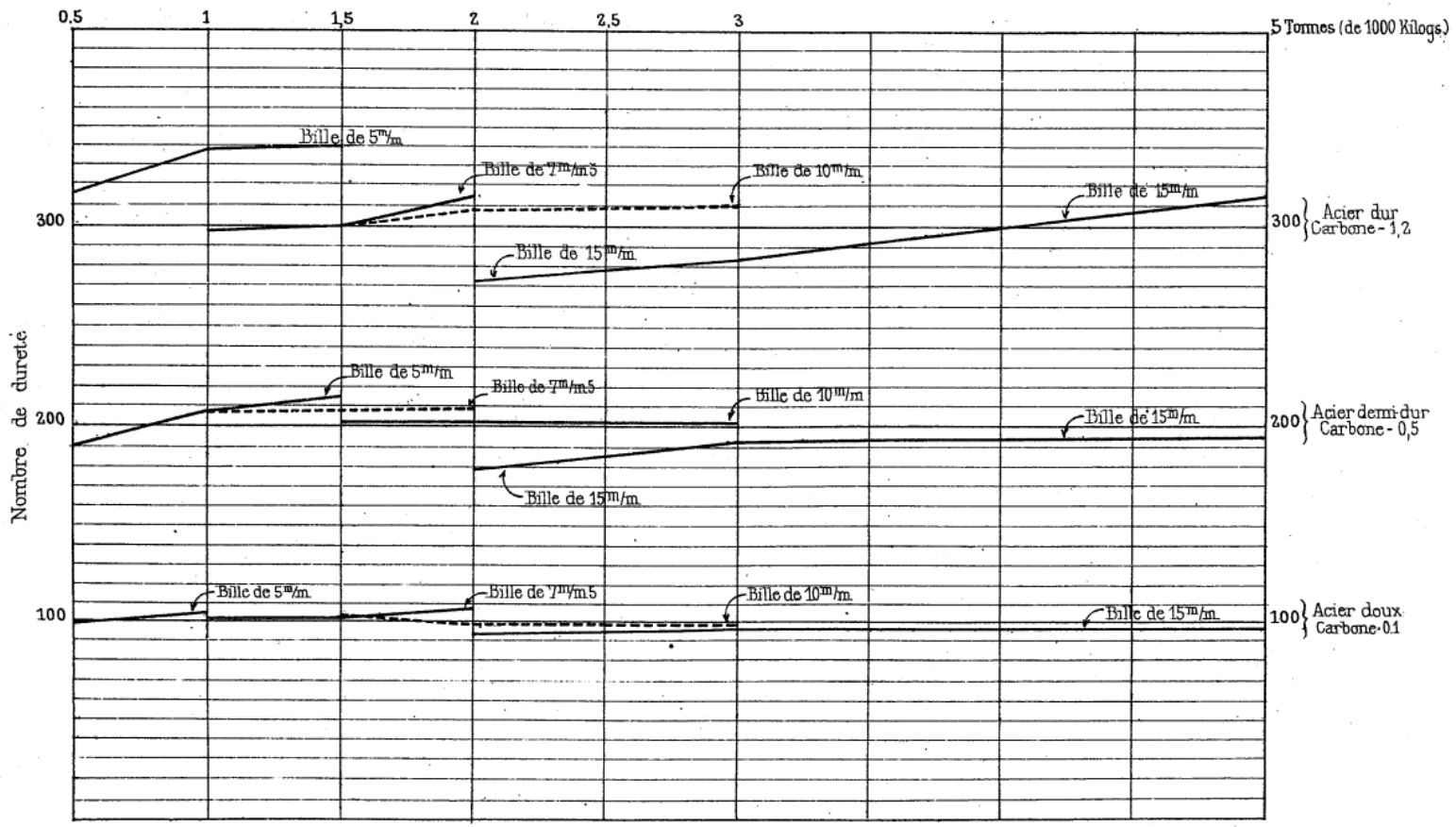
XVI. Fabrication des maillons de chaîne en acier Martin utilisés dans la construction du pont suspendu d'Esküter, de Budapest (Hongrie). Communication présentée par M. Jules Seefehlner, directeur des ateliers de construction de machines des chemins de fer de l'État hongrois, à Budapest. 321

XVII. Méthode d'épreuve des constructions en béton armé. Communication présentée par M. Considère, ingénieur en chef des ponts et chaussées, correspondant de l'Institut. 331

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

J. A. BRINELL

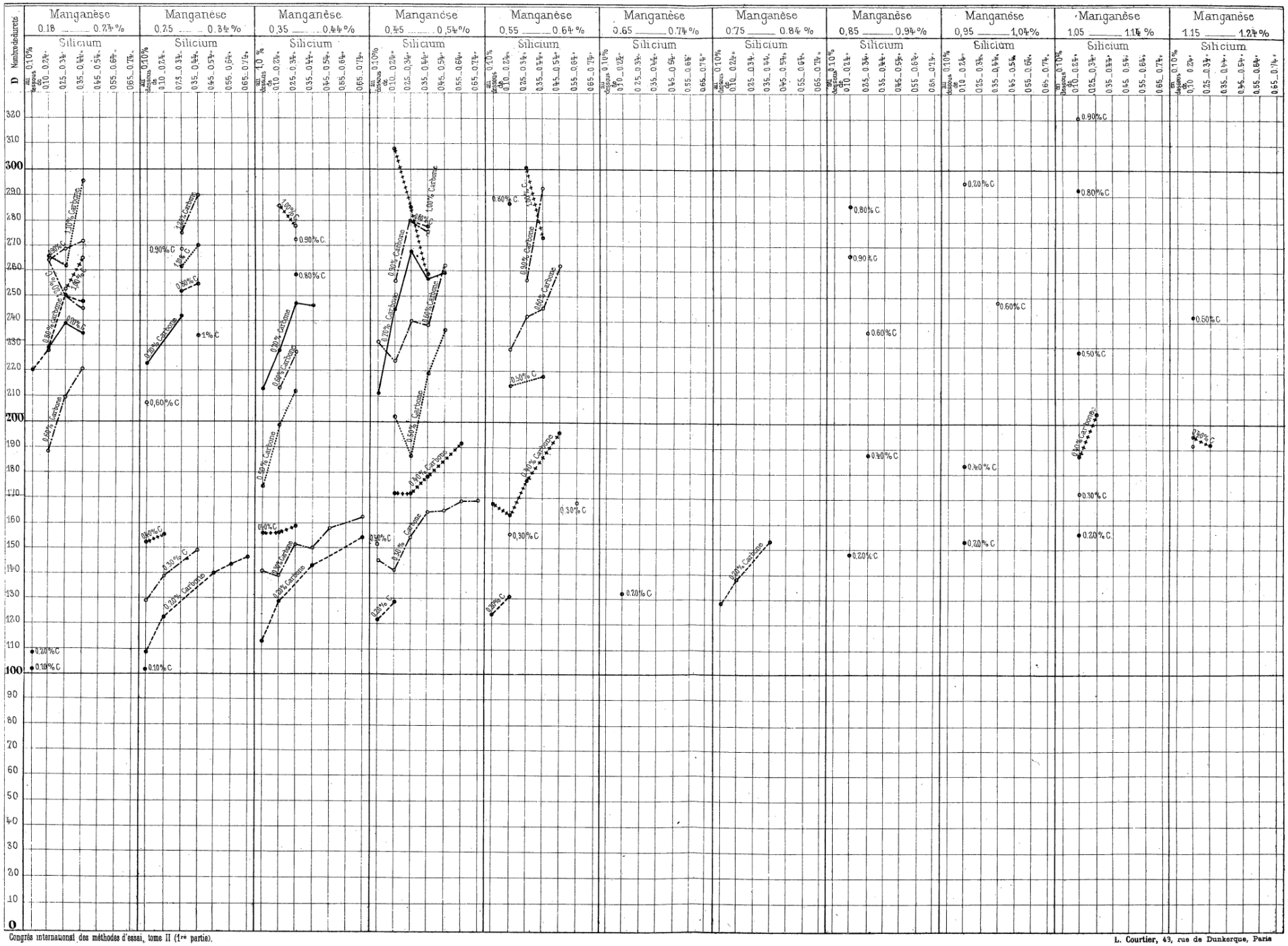
Pl. I



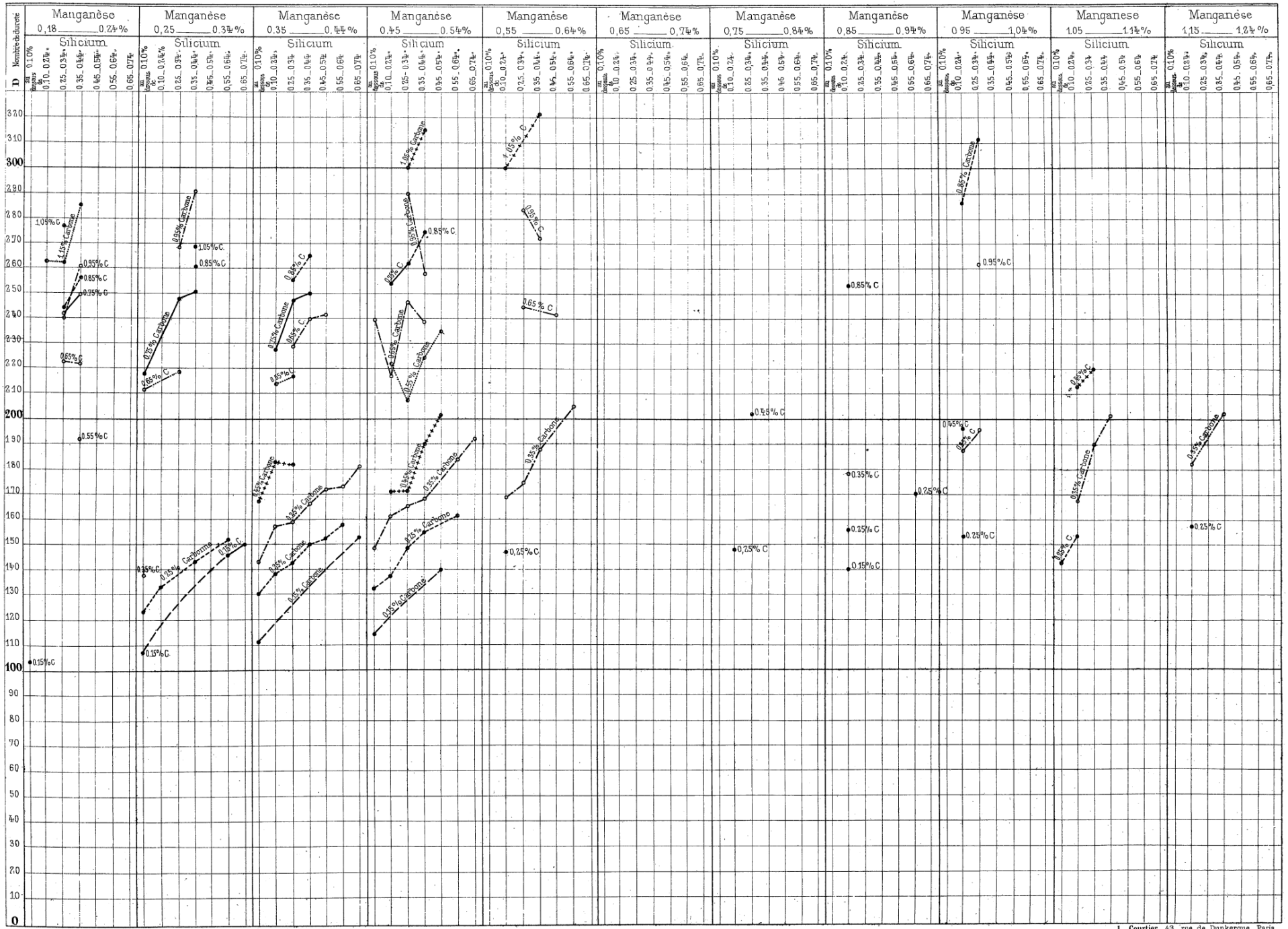
Congrès international des méthodes d'essai, tome II (1re partie)

L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



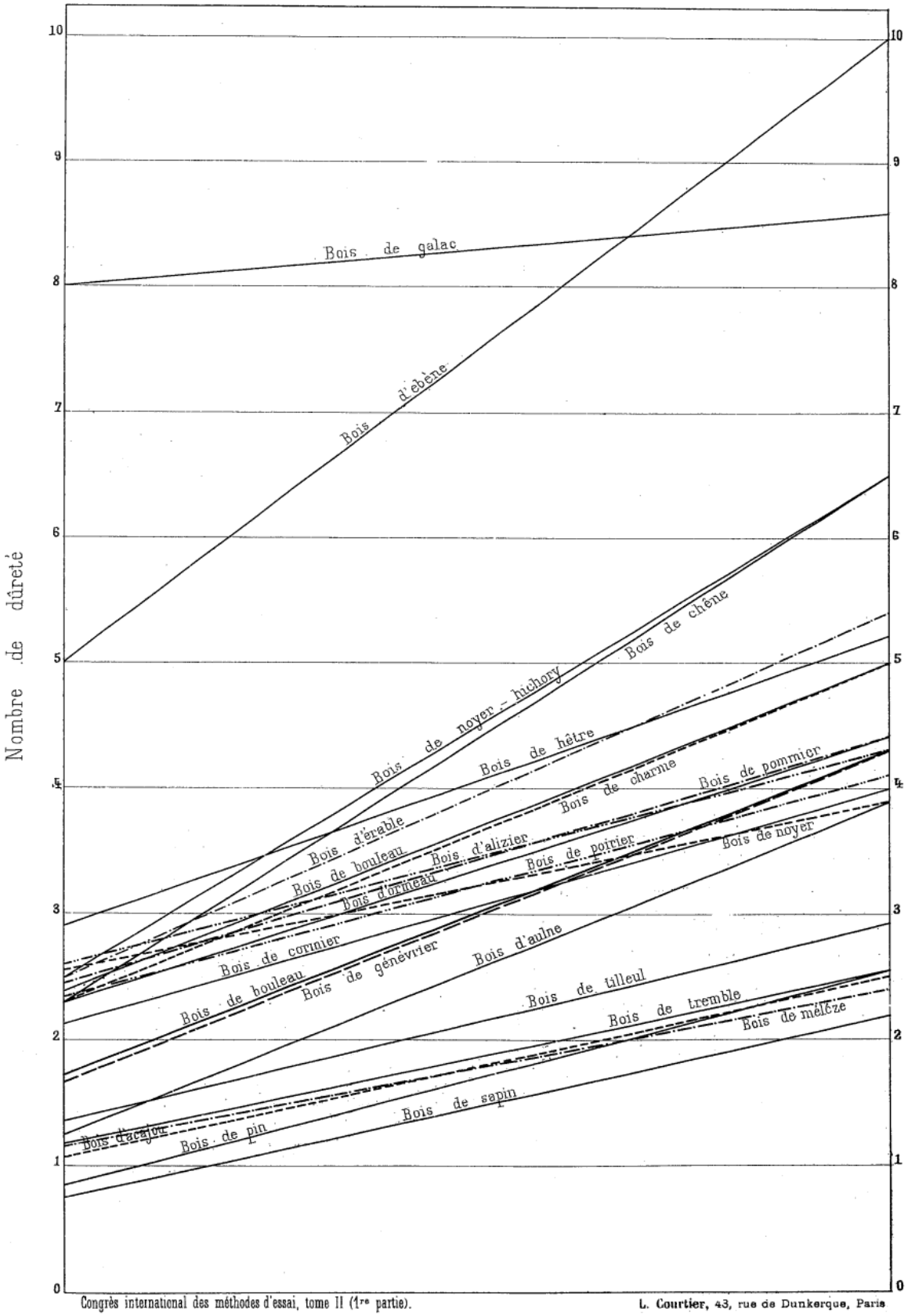
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

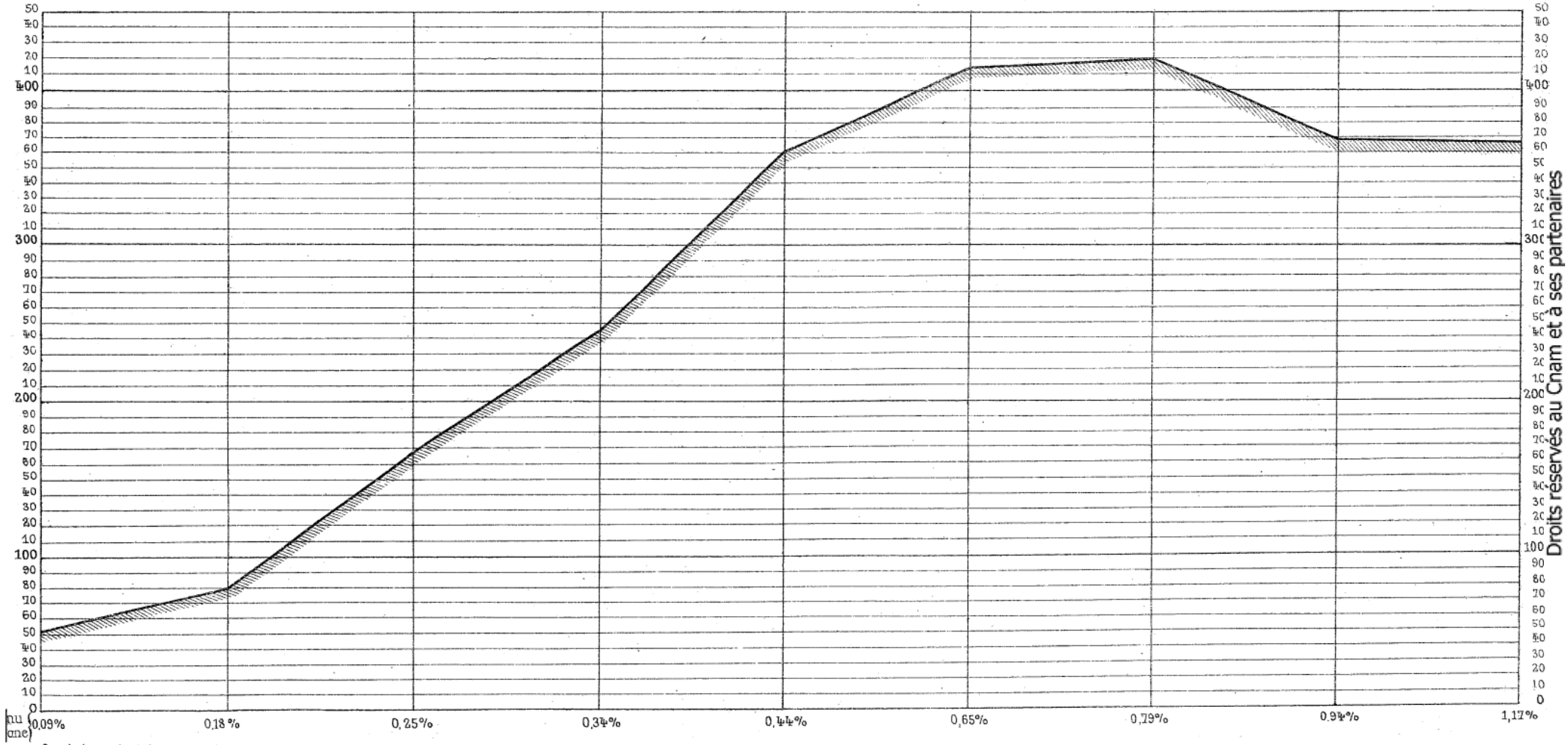
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Coupe longitudinale Coupe transversa



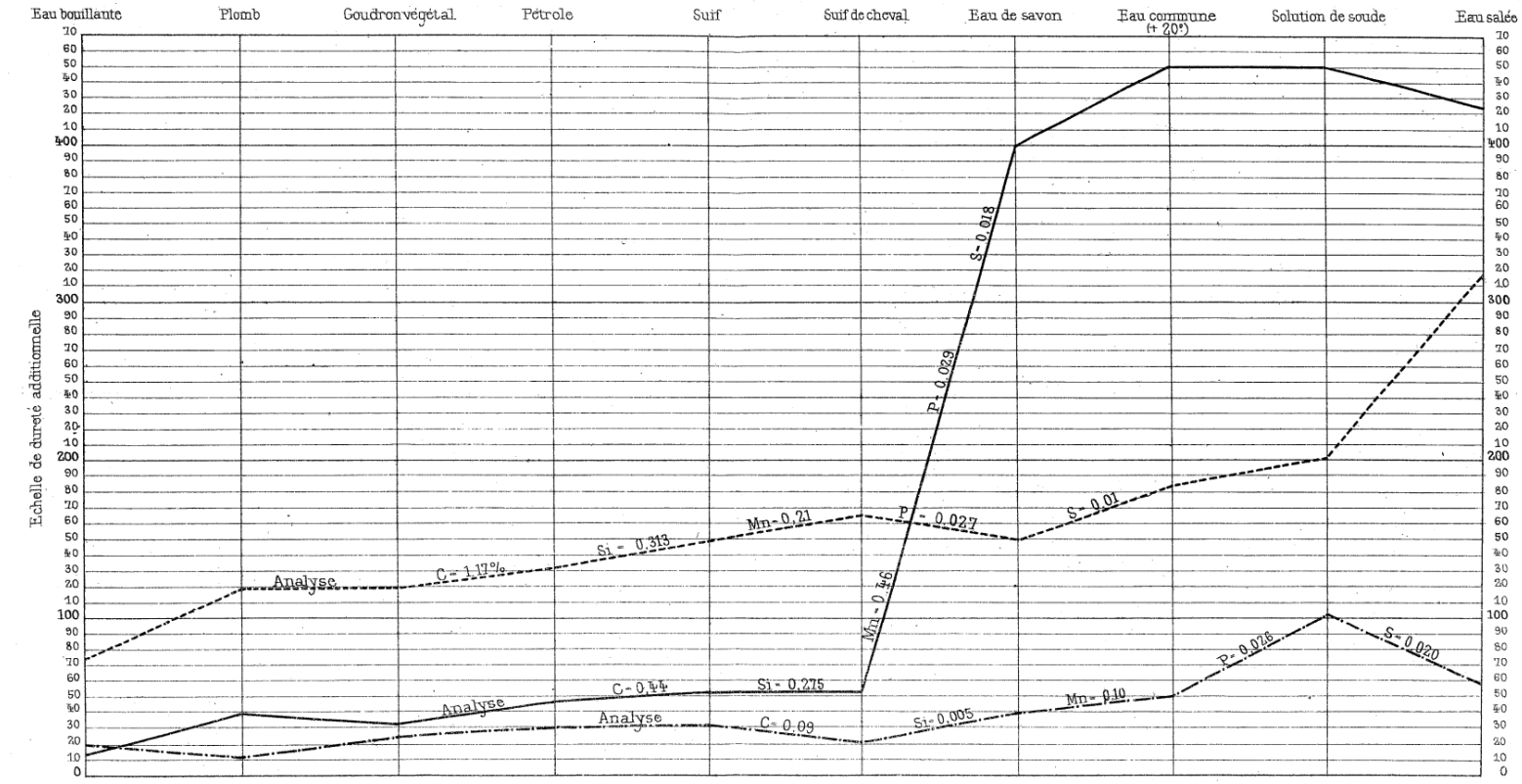
Congrès international des méthodes d'essai, tome II (1re partie). L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

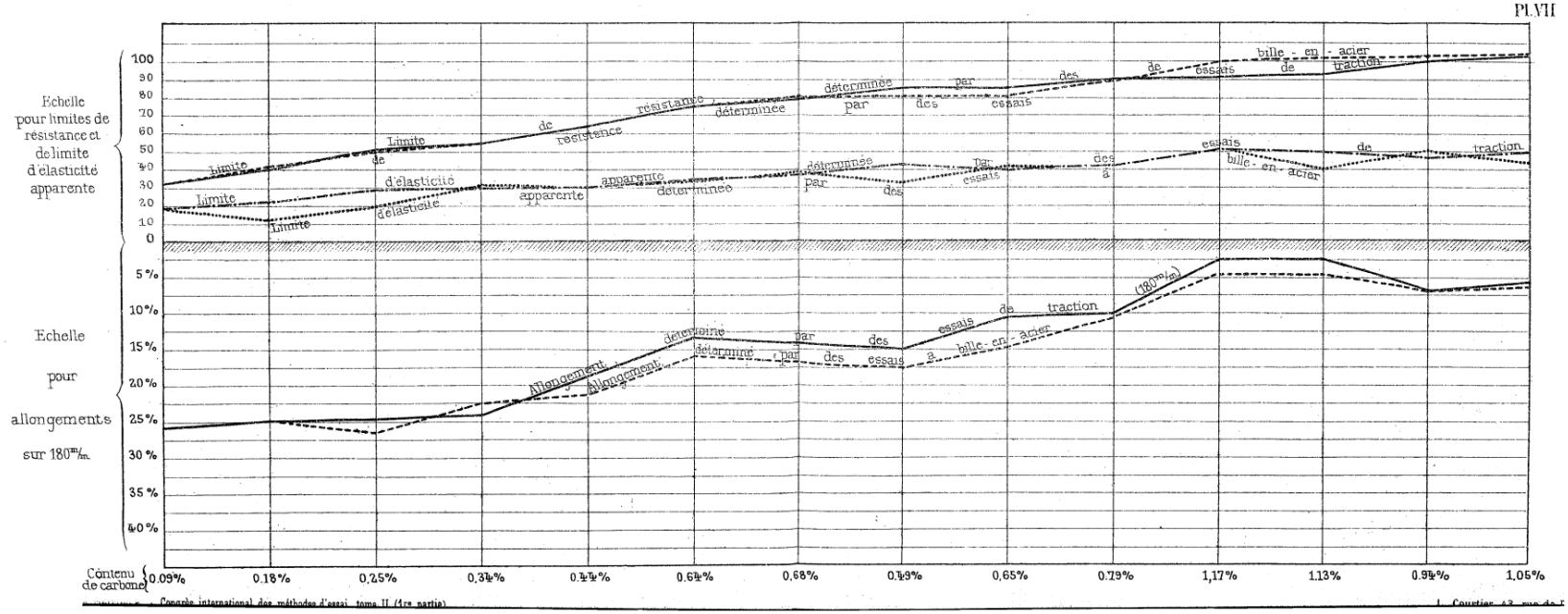
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Congrès international des méthodes d'essai, tome II (1re partie)

L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris.





Droits réservés au Cnam et à ses partenaires