

Titre général : Congrès international de mécanique appliquée. [Textes]

Auteur : Exposition universelle. 1889. Paris

Titre du volume :

Mots-clés : Exposition universelle (1889 ; Paris) ; Mécanique appliquée

Description : 1 vol. ([4]-290 p.) ; 24 cm

Adresse : Paris : Imprimerie nationale, 1891

Cote de l'exemplaire : CNAM 8 Xae 345-3

URL permanente : <http://cnum.cnam.fr/redir?8XAE345.3>



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.

CONGRÈS INTERNATIONAL
DE
MÉCANIQUE APPLIQUÉE



PARIS. — IMPRIMERIE E. BERNARD ET C^{ie}, 71, RUE LA CONDAMINE.

7° 495
8° Xae 345

CONGRÈS INTERNATIONAL
DE
MÉCANIQUE APPLIQUÉE

Tenu à Paris du 16 au 21 septembre 1889

SOUS LA PRÉSIDENCE DE M. PHILLIPS, MEMBRE DE L'INSTITUT



TOME TROISIÈME



PARIS

E. BERNARD ET C^{ie}, IMPRIMEURS-ÉDITEURS

LIBRAIRIE

53^{ter}, Quai des Grands-Augustins

IMPRIMERIE

71, Rue La Condamine, 71

1891

NOTE

SUR UNE

MÉTHODE N'EXIGEANT PAS LA MESURE DE PETITES DIMENSIONS

pour la détermination du coefficient d'élasticité
et de la limite des allongements permanents des corps métalliques

PAR
ED. PHILLIPS
MEMBRE DE L'INSTITUT



Cette méthode est fondée sur les résultats d'un mémoire antérieur (¹) dans lequel j'ai établi la théorie du spiral réglant des chronomètres et des montres.

J'ai obtenu la formule suivante

$$T = \pi \sqrt{\frac{A L}{E I}}$$

où T est la durée d'une oscillation simple du balancier et du spiral ;

A, le moment d'inertie du balancier ;

L, la longueur développée du spiral entre ses deux bouts encastrés ;

I, le moment d'inertie de la section transversale du spiral ;

E le coefficient d'élasticité du spiral.

Cette formule, rigoureuse et analogue à celle du pendule, permet de déterminer E, comme celle du pendule permet de déterminer l'intensité de la pesanteur aux divers points de la terre.

Il suffit d'étirer le corps en fil en lui donnant la forme d'un spiral de chronomètre terminé par deux courbes, des nombreux types que j'ai indiqués comme

1. *Annales des Mines*, 1861.

dounant l'isochronisme, de le relier à un balancier et de faire osciller le système. On n'a alors qu'à compter un nombre suffisant d'oscillations avec l'aide d'un compteur permettant d'évaluer le temps total, d'où l'on conclut T. Dans les nom-

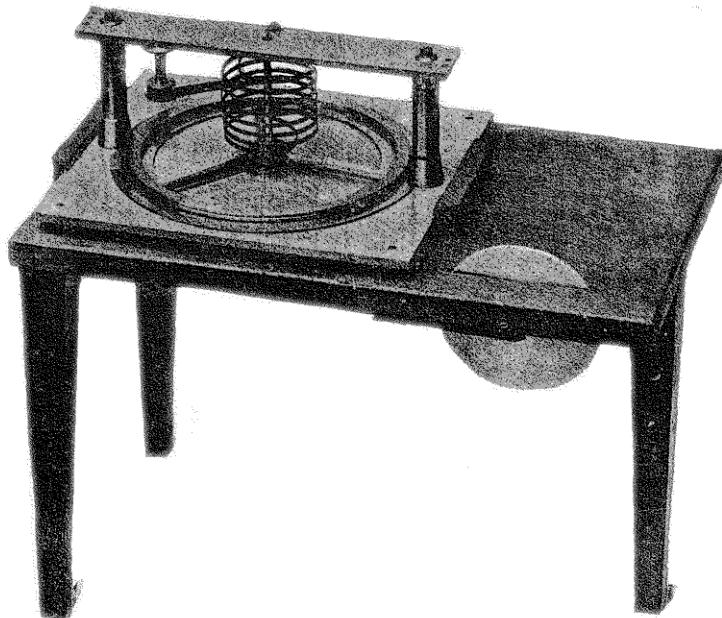


FIG. 1.

breuses expériences que j'ai faites, le nombre d'oscillations a varié entre 200 et 1000. Le fil avait une section circulaire d'environ 1 millimètre de diamètre que l'on mesurait rigoureusement avec un micromètre de précision.

En supposant la section circulaire, d'un diamètre d , la formule précédente donne

$$E = \frac{64 \pi A L}{d^4 T^2}$$

On peut aussi obtenir le coefficient d'élasticité E par un autre procédé. Dans le mémoire précité sur le spiral réglant, j'ai établi la formule suivante:

$$G = \frac{E I \alpha}{L}$$

où E, I et L ont le même sens que précédemment.

De plus G est le moment de la force qu'il faut appliquer au balancier pour le

maintenir écarté d'un angle α de sa position naturelle d'équilibre, alors qu'il n'est soumis à aucune force, l'angle α étant mesuré en arc dans un cercle d'un rayon égal à l'unité.

De cette dernière formule, on déduit E , toutes les autres quantités étant données par l'expérience. Si le fil a une section circulaire, d'un diamètre d , on a

$$E = \frac{64 G L}{\pi d^4 \alpha}$$

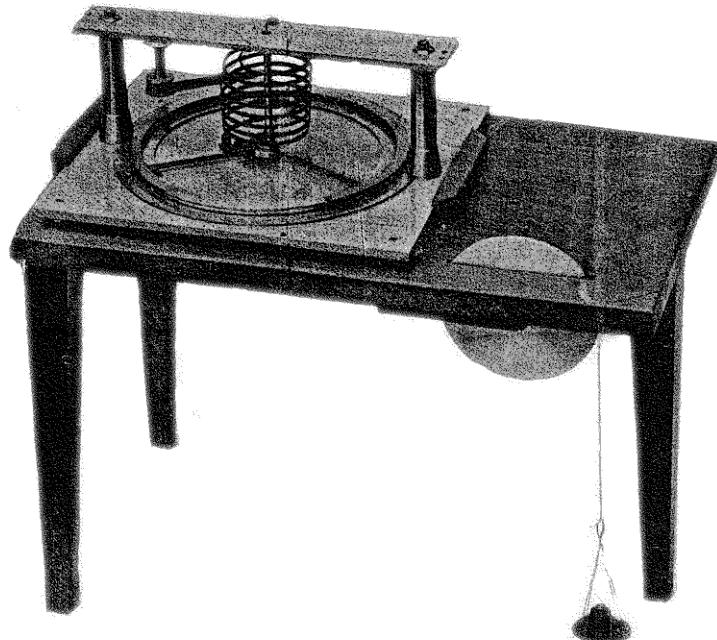


FIG. 2

Pour mesurer la limite d'allongement élastique, je me suis servi de la formule suivante établie dans le mémoire sur le spiral réglant

$$i = \frac{e \alpha}{2 L}$$

où e est l'épaisseur du spiral, L sa longueur et i l'allongement proportionnel du spiral quand le balancier est écarté d'un angle α de sa position naturelle d'équilibre. On prend pour l'angle α celui à partir duquel le balancier cesse de revenir rigoureusement à sa position naturelle d'équilibre, la force étant supprimée. Dans mes expériences, j'ai eu, pour le fer, $\alpha = 150^\circ$ et pour l'acier, $\alpha = 310^\circ$. Le minimum de α a été pour le platine, $\alpha = 30^\circ$ et son maximum pour le bronze d'aluminium (0,9 de cuivre et 0,1 d'aluminium), $\alpha = 870^\circ$.

DE L'EMPLOI
DES
MODÈLES POUR DÉTERMINER EXPÉRIMENTALEMENT
les conditions de résistance des solides élastiques

PAR
ED. PHILLIPS
MEMBRE DE L'INSTITUT

Il existe de nombreuses circonstances dans lesquelles les conditions d'équilibre des solides élastiques n'ont pu être, jusqu'à présent, déduites de la théorie mathématique de l'élasticité et ne sauraient être obtenues qu'au moyen de méthodes fondées sur des hypothèses plus ou moins approchées, lesquelles même, souvent, ne sont pas applicables. Il est donc utile de chercher comment, d'une manière générale, l'expérience peut suppléer à la théorie et fournir à priori, par les résultats de l'observation sur des modèles en petit, les conséquences désirables relatives à des corps de plus grandes dimensions qui peuvent n'être pas encore construits. C'est cette pensée qui m'a suggérée le travail dont je présente ici les conclusions et qui est entièrement fondé sur la théorie mathématique de l'élasticité (¹).

Désignons par α le rapport des dimensions linéaires du modèle à celles du corps ;

Par C , le rapport de leurs coefficients d'élasticité ;

Par γ , le rapport de leurs densités ;

Par δ , le rapport des forces agissant sur toute la masse des deux corps et rapportées à l'unité de masse. Très généralement, pour le corps lui-même, cette force est celle de la pesanteur et, si elle est aussi la pesanteur pour le modèle, on aura $\delta = 1$.

J'ai cherché la condition pour que, dans le modèle et dans le corps, deux éléments superficiels homologues quelconques, pris dans la masse, soient soumis à des forces élastiques, parallèles, de même sens, et qui, rapportées à l'unité de surface, soient dans un rapport constant.

Cette condition est très simple, elle consiste en ce que les forces uniformément

1. *Mémoires de l'Institut*, tome XXXVIII, pages 1 et 91.

réparties par unité de surface, appliquées sur la surface des deux corps, et comparées de l'un à l'autre, doivent être respectivement parallèles, de même sens et qu'en les supposant rapportées à l'unité de surface, leur rapport soit constant et égal à $\alpha \gamma \delta$. Il arrive alors que le rapport des forces élastiques rapportées à l'unité de surface, pour deux éléments superficiels homologues quelconques de la masse des deux corps est aussi égal à $\alpha \gamma \delta$.

Si, parmi les forces appliquées à la surface, il y en a qui ne soient pas uniformément réparties, mais appliquées chacune en un point, elles doivent être parallèles de même sens et dans un rapport constant égal à $\alpha^3 \gamma \delta$. Le rapport des forces élastiques, rapportées à l'unité de surface, pour deux éléments superficiels homologues quelconques de la masse des deux corps est toujours égal à $\alpha \gamma \delta$.

S'il n'y a pas de forces appliquées à la surface, le rapport des forces élastiques sur deux éléments homologues quelconques, est toujours égal à $\alpha \gamma \delta$.

Dans le cas assez fréquent où les forces agissant sur toute la masse sont nulles ou négligeables, la condition se simplifie. Elle consiste en ce que les forces uniformément réparties, appliquées à la surface doivent être parallèles, de même sens et dans un rapport constant quelconque K , en les supposant rapportées à l'unité de surface. S'il y a, sur la surface, des forces appliquées en un point, elles doivent être parallèles, de même sens et dans un rapport constant égal à $K \alpha^2$, en les supposant rapportées à l'unité de surface. Dans tous les cas, le rapport des forces élastiques, rapportées à l'unité de surface, pour deux éléments superficiels quelconques, est constant et égal à K .

Quant aux déformations, les deux corps déformés restent semblables, le rapport de similitude étant α .

1° Quand, les forces appliquées à toute la masse, n'étant pas négligeables on a $\alpha \gamma \delta = 1$.

2° Quand, les forces appliquées à toute la masse étant négligeables on a $K = 1$.

Dans ces deux mêmes cas, tout ce qui précède s'applique sans modification si, au lieu d'un seul corps, on a un système de corps soumis aux liaisons qui existent ordinairement.

On peut supposer dans tout ce qui précède, $\gamma = 1$, si nous admettons que toutes les parties correspondantes du corps ou du système du corps et du modèle soient formées des mêmes substances, et c'est ce que nous ferons pour ce qui va suivre.

Ici se place une remarque importante. Supposons le cas où la force appliquée à toute la masse du corps ou du système et qui sera, presque toujours, celle de la pesanteur, n'est pas négligeable. Alors le rapport des forces élastiques du modèle à celle du corps ou du système de corps, est $\alpha \gamma \delta$, ou pour $\gamma = 1$, $\alpha \delta$. Si la force agissant sur la masse du modèle est aussi la pesanteur, $\delta = 1$ et le rapport des forces élastiques est α . Or α sera généralement une petite fraction. Par conséquent, les forces élastiques du modèle seront trop faibles et leurs effets ne pour-

ront pas se manifester suffisamment par l'observation. Mais il existe un moyen qui, dans bien des cas, est propre à lever cette difficulté. Il consiste à substituer dans le modèle, la force centrifuge à la pesanteur.

Supposons par exemple, qu'il s'agisse d'une poutre de pont. Le modèle étant placé verticalement afin d'annuler sur lui l'effet de la pesanteur, on le ferait tourner autour d'un axe vertical situé à une distance suffisante pour que la force centrifuge, rapportée à l'unité de masse, puisse être regardée comme constante, en grandeur et direction pour tous les points du modèle et, r étant la distance moyenne du modèle à l'axe, on déterminera la vitesse angulaire de rotation ω par la condition que l'on ait

$$\frac{\omega^2 r}{g} = \delta$$

δ ayant la valeur voulue.

Par exemple, si l'on veut que les forces élastiques soient les mêmes dans le modèle et dans le corps ou système de corps, on posera

$$\alpha\delta = 1 \quad \text{d'où} \quad \delta = \frac{1}{\alpha}$$

Si l'on veut que les forces élastiques du modèle soient égales à celles du corps ou système de corps supposé soumis à une pesanteur fictive double de la pesanteur, on fera

$$\alpha\delta = 2 \quad \text{d'où} \quad \delta = \frac{2}{\alpha}$$

De même

$$\alpha\delta = 3 \quad \text{d'où} \quad \delta = \frac{3}{\alpha}$$

Si l'on veut que les forces élastiques du modèle soient égales à celles du corps ou système de corps supposé soumis à une pesanteur fictive triple de la pesanteur, et ainsi de suite.

J'ai appliquée cette théorie à divers exemples, notamment au pont tubulaire Britannia élevé sur le détroit de Menai.

Les données sont :

Longueur du pont en 4 travées inégales 430 mètres ; poids d'un tube 4 740 000 kilogrammes.

J'ai pris, pour le modèle, une échelle de $\frac{1}{50}$, soit $\alpha = \frac{1}{50}$. De là résultent :

Longueur du modèle 8^m,60 ; poids du tube formant le modèle 38 kilogrammes.

J'ai supposé l'axe de rotation situé à une distance moyenne de 2 mètres du modèle.

En faisant d'abord $\alpha \delta = 1$, on a $\frac{\omega^2 r}{g} = 50$, d'où $\omega = 15^m,65$
ce qui répond à 2 tours 1/2 par seconde.

Pour $\alpha \delta = 2$, il faut 3 tours 1/2.

Pour $\alpha \delta = 3$, il faut 4 tours 1/3.

Pour $\alpha \delta = 4$, il faut 5 tours, etc.

Supposons, en outre, qu'on ait, en un certain point du pont, une charge isolée de 10000 kilogrammes et cherchons le poids P à appliquer contre le point homologue du modèle pour que la force centrifuge due à ce poids exerce sur le modèle l'effort transversal exigé.

En faisant $\alpha \delta = 1$, on a

$$\frac{P}{g} \omega^2 r = \alpha^2 \times 10000 = 4 \text{ et, comme } \frac{\omega^2 r}{g} = 50.$$

on a $P = 0^k,080$.

Pour les autres vitesses examinées ci-dessus, la force centrifuge du poids P variera comme la pesanteur fictive du pont.

On déterminerait d'une manière analogue, pour le modèle, les conditions de la charge uniformément répartie.

NOTE

SUR LE

FROTTEMENT DES CUIRS EMBOUTIS ET LA MESURE EXACTE des hautes pressions.

Machines d'essai des matériaux sans bascule

COMMUNICATION DE M. GEORGES MARIÉ

INGÉNIEUR DES CHEMINS DE FER P.-L.-M.

UTILITÉ DES MACHINES D'ESSAI PUISSANTES, SIMPLES ET ÉCONOMIQUES

Il est incontestable que les machines d'essai des métaux et des matériaux en général, ont rendu les plus grands services à l'art de l'Ingénieur ; elles servent tout d'abord à définir exactement la qualité des métaux que l'ingénieur commande à une usine ; elles servent aussi à l'industriel pour suivre et améliorer journellement sa fabrication.

Le plus souvent on découpe à froid des éprouvettes dans le métal soumis à la réception ; la forme de ces éprouvettes a une grande importance et le choix de cette forme est l'une des questions les plus importantes qui soient soumises à ce congrès.

Mais le découpage de l'éprouvette est parfois un travail un peu coûteux ; de plus elle ne mesure la qualité du métal qu'en un point ; il y a donc souvent intérêt à essayer la pièce elle-même, d'un seul coup, en sacrifiant, par exemple, une pièce sur cinquante ou sur cent pour cet essai. C'est ce qu'on fait pour les tendeurs d'attelage, les essieux, les bandages, etc., du matériel des chemins de fer. Souvent ces pièces sont faciles à rompre ; mais quelquefois les pièces exigent de grands efforts pour être rompues ; c'est le cas des bandages et essieux par exemple. Jusqu'à présent on fait l'essai de ces pièces d'une grande résistance au moyen de l'essai au choc par le mouton. Mais chacun sait que cet essai donne des résultats variables suivant l'élasticité de la chabotte ou d'autres éléments variables. Il y a donc un grand intérêt, en résumé, à être en possession d'une machine d'essai d'une grande puissance, donnant un effort de 500 à 1000 tonnes par exemple. J'ajouterai qu'une semblable machine peut rendre de grands services

dans l'essai des matériaux de construction comme pierres de taille, mortiers, etc.

D'une façon générale, l'essai au choc donne assez bien l'idée de la flexion que peut prendre une pièce avant de se rompre, mais il donne des renseignements douteux sur la raideur.

Je ne veux pas dire que les essais au choc devront être exclus ; mais au lieu de faire un essai au choc d'une pièce sur cinquante, on pourrait en essayer une au choc et une sur cent à la presse.

MACHINES D'ESSAI SANS BASCULE

La plupart des machines d'essai se composent d'une presse hydraulique avec piston pour exercer l'effort et d'une balance pour mesurer cet effort. Rien n'est si simple que de faire une presse hydraulique pour exercer un effort de 500 à 1 000 tonnes, avec une pression d'eau de 200 à 500 kilogrammes par centimètre carré ou même davantage. Mais il est au contraire très difficile et très coûteux de construire une bascule aussi puissante. La machine d'essai serait donc incomparablement plus simple si l'on pouvait supprimer la bascule et mesurer l'effort exercé d'après la pression de l'eau dans la presse hydraulique. J'ai fait, il y a quelques années, des expériences dont je vais dire quelques mots ; ces expériences montrent que la chose est facile.

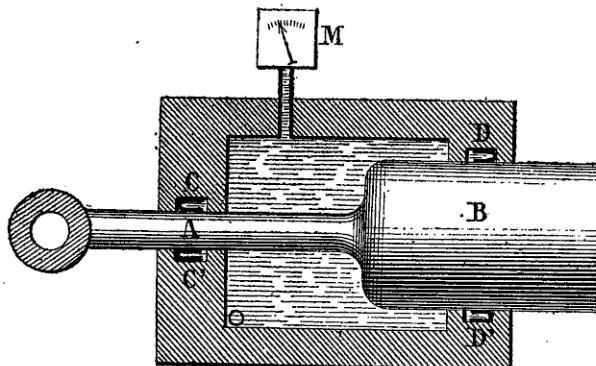


FIG. 1.

La première objection qui se présente est la mesure du frottement du cuir embouti ; or, on verra tout à l'heure que ce frottement est absolument négligeable et qu'il n'atteint pas 1/2 pour cent de la valeur de l'effort à exercer ; c'est là le point capital sur lequel je désire appeler toute votre attention.

La deuxième difficulté est la mesure exacte de la pression. J'ai fait construire à cet effet une soupape très simple qui permet de mesurer la pression avec précision, jusqu'à 1 200 atmosphères au besoin ; je vais en reparler plus loin.

Ces deux difficultés étant simplement résolues, comme on va le voir, la construction des machines d'essai devient de la plus grande simplicité.

Si la machine doit opérer à la traction, le piston aura la forme différentielle comme en AB de la figure 1; il y a alors deux cuirs emboutis CC', DD'; la pression se mesure sur l'appareil M, dont je reparlerai; l'effort se calcule d'après la pression de l'eau et en négligeant le frottement des cuirs emboutis.

Si, au contraire, la machine doit agir par compression, elle se compose alors d'une simple presse hydraulique ordinaire.

Il me reste à prouver que le frottement des cuirs emboutis est négligeable et à montrer comment je mesure la pression.

FROTTEMENT DES CUIRS EMBOUTIS

Dans la plupart des aides-mémoire on trouvait, il y a quelques années à peine, que ce frottement représente environ 20 % de l'effort exercé par le piston.

Dans une conversation que j'eus avec M. Twedell, il y a environ dix ans, cet ingénieur anglais me dit qu'il pensait que le frottement des garnitures (presse-étoupes) pour presses hydrauliques était bien plus faible qu'on ne supposait. Moi-même, d'après les observations que j'ai eu l'occasion de faire sur les presses hy-

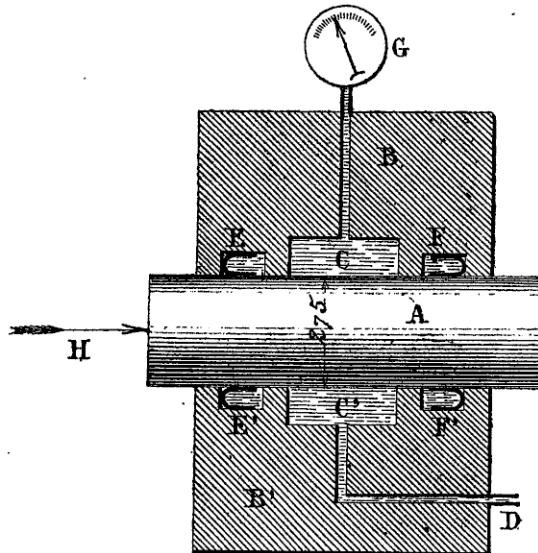


FIG. 2

drauliques, je fus bientôt convaincu de la petitesse du frottement des cuirs emboutis. Bref, je fis en 1880 les expériences suivantes pour élucider cette question d'une façon définitive.

Mon appareil d'expérience se composait (fig. 2) d'un piston A de 275 milli-

mètres de diamètre. Ce piston A traversait complètement un gros bloc d'acier BB' qui contenait en son milieu une capacité CC' pleine d'eau. L'eau comprimée venait en D, la pression étant maintenue par les cuirs emboutis EE' et FF'. La pression de l'eau était mesurée par le manomètre G.

Pour faire une expérience on comprimait de l'eau dans la capacité CC', et on notait la pression ; puis on poussait le piston et on mesurait avec un dynamomètre l'effort H, nécessaire pour obtenir ce déplacement. Cet effort représentait la valeur du frottement des deux cuirs emboutis pour le diamètre de 275 millimètres et pour la pression considérée.

J'ai mesuré avec cet appareil le frottement des cuirs emboutis depuis 10 jusqu'à 600 kilogrammes par centimètre carré de pression ; j'ai trouvé *comme maxima* les chiffres suivants pour la valeur du frottement f d'un cuir embouti divisé par la valeur F de l'effort qu'exercerait un piston de même diamètre dans une presse hydraulique ordinaire.

Pour 10 kilos par centimètre carré	$\frac{f}{F} = 0,0021$
» 100 » » »	$\frac{f}{F} = 0,0020$
» 300 » » »	$\frac{f}{F} = 0,0014$
» 600 » » »	$\frac{f}{F} = 0,0011$

Ainsi, ce frottement est de 2 pour 1000 pour les basses pressions et de 1 pour 1000 pour les plus fortes.

Si le piston se rouille légèrement, le frottement augmente un peu. Il est du reste facile de l'entretenir dans un état de propreté suffisante, si l'on tient à obtenir une grande précision dans l'évaluation de l'effort ; la graisse du cuir suffit pour cela.

Voilà donc la première difficulté résolue ; le frottement du cuir embouti ou des cuirs emboutis est négligeable.

MESURE DES HAUTES PRESSIONS DE L'EAU

A cette époque, il y a huit ans, les manomètres du commerce étaient mal gradués pour les hautes pressions. J'ai alors songé à employer une soupape pour mesurer la pression de l'eau.

Or, il est impossible d'employer une soupape ordinaire, à siège, pour mesurer les hautes pressions (fig. 3) ; en effet, on est obligé de donner au siège de la soupape une surface presque aussi grande qu'à la section libre de la soupape elle

même ; sans cela, ce siège serait écrasé quand la soupape retombe. Dans ces con-

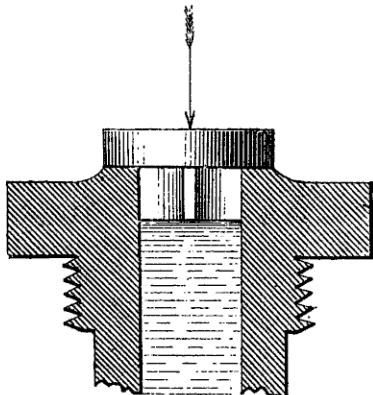


Fig. 3

ditions, la soupape se soulève à des pressions variables, suivant la manière dont l'eau se glisse sous le siège au moment du soulèvement. Ce système a été essayé et a donné de mauvais résultats.

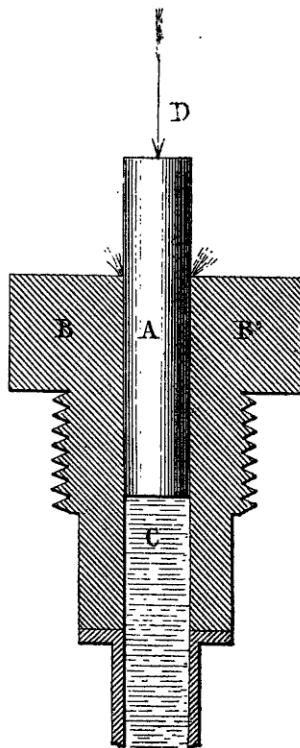


Fig. 4

J'ai alors songé à employer une soupape sans siège (fig. 4), se composant d'un piston A ayant 10 ou 20 millimètres de diamètre, se mouvant dans un cylindre

BB' avec aussi peu de jeu que possible, mais sans frottement. L'eau dont il faut mesurer la pression arrive en C. On mesure cette pression d'après le diamètre du piston A et d'après le poids D que cette pression est capable de soulever.

Le poids D peut être une charge directe, mais j'ai préféré une petite bascule. Le travail d'ajustage est facile à faire de telle façon que la fuite ne soit que de quelques gouttes d'eau par seconde à 1200 atmosphères ; cependant, le frottement est assez faible pour que la soupape tombe sous son propre poids, qui est de quelques grammes quand l'eau ne la soulève pas. J'ai employé le bronze d'aluminium à 10 % pour le piston A et le cylindre B, pour éviter l'oxydation. Mais l'acier bien entretenu suffit parfaitement. Tel est mon appareil dans toute sa simplicité.

Je dois rappeler que les soupapes sans siège avaient déjà été employées pour mesurer la pression des gaz dans les canons par divers expérimentateurs.

Cet appareil soulève quelques objections que je vais indiquer pour qu'il ne reste aucun doute dans votre esprit.

(Elles sont longuement étudiées dans un mémoire que j'ai publié dans les *Annales des mines* de janvier-février 1881).

1° Erreur relative due à la quantité de mouvement de la fuite d'eau..	0,0000037
2° Erreur relative due au frottement de l'eau entre le piston et le cylindre.	0,0044
3° Erreur relative due à la mesure du diamètre.	0,0027
4° Erreur relative due à la dilatation des pièces	0,0004
TOTAL.	0,0075

Soit moins de $\frac{8}{1000}$; en réalité l'erreur est moindre, car il y a des erreurs de signe contraire tandis que nous les avons toutes ajoutées dans ce résumé.

Il reste cependant une cause d'erreur dont il faut se méfier, c'est l'erreur due à un coincement métallique du piston, en cas de mauvaise construction de la soupape ou de la petite bascule qui mesure sa charge. Pour m'assurer que ce coincement n'existe pas, j'ai imaginé un appareil que l'on pourrait appeler un manomètre métallique sans frottement. Cet appareil se composait (fig. 5) d'un tube manométrique aplati en spirale AB. L'eau arrivait en A, allait jusqu'au bout B du tube, où se trouvait fixée une longue aiguille BC. Quand la pression augmentait, l'aiguille se déplaçait sur la graduation DE.

Cet appareil m'a servi à mesurer les coincements ou frottements métalliques de la soupape de la manière suivante : Je faisais monter doucement la pression et je notais sur la graduation DE le point M pour lequel la soupape se soulevait, puis je faisais baisser la pression et je notais le point N pour lequel la

soupape s'abaissait. Quand la soupape est bien construite, les points M et N se confondent exactement.

Les bons manomètres du commerce étant pratiquement sans frottement, peuvent servir à remplacer l'appareil ci-dessus pour vérifier l'absence de coincement de la soupape. Je conseille seulement de les construire sans dépasser la limite d'élasticité de l'acier du tube, pour éviter le déplacement du zéro ; je conseille aussi d'employer des transmissions par leviers, du tube à l'aiguille, et point d'engrenages.

Un tel manomètre est un puissant auxiliaire de la soupape. Il peut servir pour mesurer la pression, dans la pratique en le vérifiant de temps en temps avec la soupape. On fait actuellement d'autres soupapes sans siège et à garnitures sans frottement. Je citerai la disposition de M. Neel, chef de l'atelier des essais de P.-L.-M., et celle de M. Bourdon, constructeur de manomètres.

Donc, actuellement, la mesure des hautes pressions est résolue.

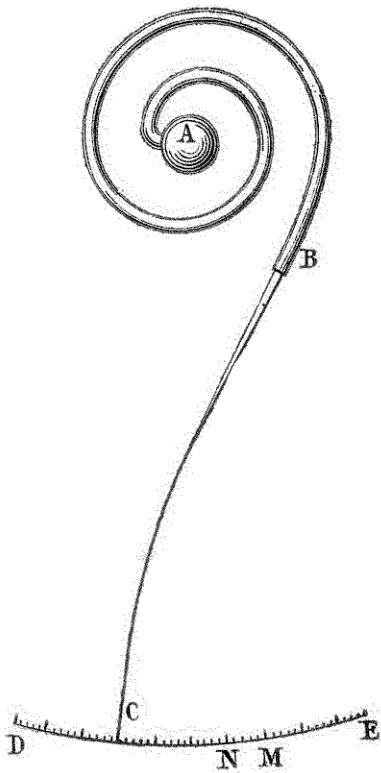


FIG. 5.

CONCLUSION

On voit donc que rien n'est si facile que de faire une excellente machine d'essai avec une simple presse hydraulique sans bascule.

Si l'on veut avoir une machine d'essai de 500 à 1000 tonnes, capable de mesurer l'effort à moins de $\frac{1}{100}$ près, on installera la soupape décrite ci-dessus et un bon manomètre métallique ; les essais se feront au manomètre qui sera fréquemment vérifié avec la soupape. La pression de l'eau sera fournie par une pompe à plusieurs cylindres. On peut choisir la pression maximum de l'eau entre 200 et 1000 kilogrammes par centimètre carré. Puis on ajoutera, à côté de la pompe, un compresseur qui se compose d'un piston plongeant dans un cylindre et qu'on peut faire pénétrer plus ou moins profondément au moyen d'une transmission par

vis. Ce compresseur marchera à la vapeur ou à la main ; c'est, en quelque sorte, la vis micrométrique qui complète les pompes, pour les essais de précision ; c'est avec lui qu'on fera monter la pression pour graduer le manomètre métallique.

On verra, dans les ateliers de la Compagnie P.-L.-M., une remarquable installation de ce genre établie par M. Lebasteur, ingénieur chargé du contrôle ; elle a été appliquée à une machine à essayer les bandages, basée sur les principes qui précédent.

Si, au contraire, on se contente d'une précision de $\frac{1}{20}$ à $\frac{1}{30}$ par exemple, dans la mesure de l'effort, on peut alors supprimer la soupape et le compresseur. On ne conserve plus que la presse hydraulique et le manomètre métallique acheté chez un bon constructeur. Telle est la machine d'essai dans sa plus grande simplicité. Elle peut rendre de grands services à cause de son bon marché ; je la recommande à toutes les forges où les essais servent à guider la fabrication. Elle peut aussi servir pour mesurer la résistance des pierres, ciments, des bois de charpente, car une telle machine est très portative.

La grande puissance de cette machine d'essai permet d'essayer à la compression de véritables blocs de maçonnerie, en pierres et mortier, ce qui est le meilleur moyen d'essayer les mortiers. En ce moment même, en Autriche, on fait par ce procédé des essais très intéressants sur la valeur comparative du fer et de différents aciers au point de vue de l'emploi dans les ponts métalliques. On construit avec ces métaux de véritables poutres en treillis, toutes pareilles, et on les essaie à la presse hydraulique par flexion sur deux points d'appui. Dans ces conditions, l'essai des métaux à l'éprouvette est insuffisant ; on sait, en effet, que la difficulté qu'on rencontre dans l'application de l'acier aux ponts, c'est l'affaiblissement du métal dans le voisinage des trous de rivets ; en essayant une poutre entière à la presse hydraulique on fait donc un essai plus rationnel que par tout autre moyen.

On peut se servir aussi de cette machine pour comparer la résistance des bois.

Je le répète, l'essai des pièces toutes faites avec des machines, très puissantes, est appelé à rendre des services dans la mécanique et la construction.

Enfin la presse hydraulique avec la soupape peut servir à faire des essais dynamométriques, comme, par exemple, pour mesurer la traction sur la barre d'attelage d'un train de chemin de fer. La soupape peut être chargée d'un ressort et sert à enregistrer les variations de l'effort.

Telles sont les principales applications de l'étude précédente.

La faiblesse du coefficient de frottement que je viens d'indiquer pour les cuirs emboutis pouvant étonner quelques personnes, il est facile d'établir des points de comparaison qui feront comprendre que ce résultat est tout naturel.

J'ai opéré sur des cuirs emboutis ayant environ comme hauteur $\frac{1}{10}$ du diamètre d du piston. Si donc $\frac{\pi d^2}{4}$ est la section du piston, la surface de contact du cuir est égale à $\pi d \times \frac{d}{10} = \pi \frac{d^2}{10}$ soit exactement les $\frac{4}{10}$ de la section du piston. Le coefficient de frottement proprement dit, est donc égal à $\frac{10}{4}$ des chiffres indiqués plus haut qui sont 0,002 entre 10 kilogrammes et 100 kilogrammes par centimètre carré et 0,001 à 600 kilogrammes ; cela ferait donc pour le coefficient de frottement :

0,0050 entre 10 et 100 kilogrammes par centimètre carré.

0,0025 à 600 kilogrammes par centimètre carré.

Or, remarquons que, grâce à la fuite d'eau entre le cuir embouti, on a une excellente lubrification ; comparons avec les coefficients de frottement de métal sur métal, avec lubrification par l'huile ou par l'eau.

1^o Le professeur américain Thurston donne dans son ouvrage sur le frottement le chiffre de 0,004 environ, avec graissage à l'huile de spermaceti (page 177 de son ouvrage).

2^o La Société des Mechanical Engineers de Londres a fait des expériences encore plus soignées et on a trouvé le coefficient de frottement de 0,001 à 0,002 à la pression de 36 kilogrammes par centimètre carré. (Proceedings de novembre 1883, page 643.)

3^o Enfin dans le chemin de fer Girard où l'eau sert à lubrifier le patin, on trouve un coefficient de frottement entre 0,001 et 0,0005 seulement.

Donc le coefficient de frottement que j'ai trouvé n'a rien d'extraordinaire et est même plus fort que les chiffres que je viens de citer.

Il faut seulement avoir bien soin que le cuir soit assez bas pour que la fuite existe ; sans cela le frottement pourrait augmenter considérablement par suite de l'absence de lubrification ; cette fuite était de 6 centimètres cubes par seconde environ dans mes expériences, soit environ 3 centimètres cubes pour un seul cuir embouti de 270 millimètres de diamètre, à 600 atmosphères ; c'est peu, mais cela suffit. Mes expériences n'ont porté que sur des cuirs emboutis ; avec des joints en caoutchouc la fuite est supprimée et le frottement est plus fort.

CONFÉRENCE SUR LES PROGRÈS RÉALISÉS

PAR LES

Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur

PAR

M. BOUR

DIRECTEUR DE L'ASSOCIATION LYONNAISE
DES PROPRIÉTAIRES D'APPAREILS A VAPEUR

Les associations de propriétaires d'appareils à vapeur ont pour but de prévenir les accidents et les explosions des chaudières-générateurs de vapeur, et de faire réaliser à leurs membres des économies dans la production et l'emploi de la vapeur.

C'est à M. W. Fairbairn que revient l'honneur de la fondation de la première association de ce genre, *The Manchester Steam Users Association*, établie à Manchester en 1855.

Permettez-moi d'emprunter à une note publiée par M. Aguillon, ingénieur en chef des mines, les détails suivants sur la constitution de cette association et sur les différences qui existent entre son fonctionnement et celui des autres associations anglaises qui se sont établies depuis (¹).

« *The Manchester Steam Users Association* se constitua exactement dès l'origine, avec l'objet et d'après les principes qui devaient être ensuite pris pour modèles par toutes les associations qui se sont établies depuis sur le continent. Dès la fondation, cette association de propriétaires d'appareils à vapeur devait s'administrer elle-même ; ayant pour ressources la cotisation que chacun de ses membres devait payer par chaudière, et ne recherchant aucun intérêt pécuniaire direct, elle se proposait simplement de faire éviter à ses membres l'explosion de leurs chaudières et de leur faire réaliser des économies dans l'emploi de la vapeur.

« La sécurité devait être obtenue par une surveillance des chaudières effective et efficace, au moyen de visites extérieures et intérieures faites par des agents spéciaux, compétents et indépendants, appartenant à l'association.

« L'économie dans l'emploi de la vapeur devait être obtenue par des essais à l'indicateur faits sur les machines, par des expériences de rendement et de consommation, par des études et recherches d'un caractère général, que l'Association devait entreprendre à ses frais, et enfin par tous les renseignements et documents sur les chaudières et les machines, réunis par les ingénieurs de l'association, et

1. *Annales des Mines*, 1880.

tenus par eux à la disposition des membres, qui devaient pouvoir leur demander toute consultation sur ces questions.

« Tel fut le programme tracé dès la première heure. En réalité, ce n'a été que dans ces dernières années, et bien après les exemples donnés par l'association de Mulhouse, que l'association de Manchester donna un certain développement aux essais de machines et à tout ce qui se rapporte à l'économie dans l'emploi de la vapeur. Jusque là, elle s'était bornée à la surveillance des chaudières, aux visites intérieures et extérieures ; en un mot, à ce qui concernait la sécurité. L'association de Manchester n'étend son action que dans un rayon de 60 kilomètres autour de cette ville.

« A la fin de son premier exercice, le 31 décembre 1855, elle comptait 269 membres, ayant 920 chaudières ; au 31 décembre 1859, elle avait 530 membres avec 1619 chaudières.

« Mais, à ce moment, elle subit un assez long arrêt dans son développement, par suite de la constitution d'une nouvelle société, qui se proposait d'atteindre le même objet par des principes assez différents.

« La « *Boiler Insurance and Steam Power Company*, » qui fut créée au début de 1859, était une véritable société financière par actions, se proposant de faire l'assurance des chaudières en même temps que de procéder à leur inspection ou surveillance.

« Beaucoup de membres quittèrent l'Association de Manchester pour s'affilier à la nouvelle société, et, à la fin de 1860, l'Association de Fairbairn n'comptait plus que 1360 chaudières ; à la fin de 1864, elle n'était remontée qu'à 1415, tandis que la *Boiler Insurance Company* en avait déjà 10000.

« Aussi, en 1865, l'Association se décida-t-elle, à son tour, à assurer chacune des chaudières de ses membres contre toute explosion et ses suites, jusqu'à un maximum de 7500 francs, sous la condition que chaque chaudière, ainsi garantie, devait être soumise, obligatoirement chaque année, à une visite intérieure, à la suite de laquelle il lui serait délivré un certificat de bon conditionnement. L'ingénieur de la société a le droit de suspendre la garantie au cas où ses observations pour l'entretien et la conduite de l'appareil restent sans effet, et elle est, en tout cas, suspendue de droit si on laisse écouter treize mois sans faire procéder à une visite intérieure.

« En même temps, dix membres du conseil faisaient un fonds de garantie de 250 000 francs, affectés au paiement des dégâts éventuels produits par une explosion, pour le cas où les cotisations et les excédants annuels accumulés n'auraient pas permis de les couvrir.

« Au commencement de 1877, après douze ans d'exercice, il n'y a pas eu un seul sinistre à payer, et la garantie a été élevée à un maximum de 10000 francs. Il y a là un fait qui parle assez éloquemment de lui-même.

« A partir de 1865, et sous l'influence de ces mesures, le développement de

l'association a d'ailleurs repris sa marche ascendante : au 31 décembre 1879 elle comptait 1301 membres et 3657 chaudières (¹).

« L'Association fait actuellement une visite intérieure par chaudière et par an, et deux visites extérieures. La cotisation est de 37 francs par chaudière.

« Depuis 1877, l'Association a organisé pour ses membres, moyennant une cotisation supplémentaire, l'inspection périodique des machines et le relevé des diagrammes. Dans l'exercice 1879, ces opérations ont été faites sur 412 cylindres.

« Cette Association est la seule en Angleterre fonctionnant sur ce type, adopté partout au contraire sur le continent. En 1858, il s'en forma bien une à Huddersfield, l'Association de Manchester ayant refusé d'étendre son action jusque là. Mais, au bout de trois ans, elle fut dissoute, et la plupart des membres entrèrent dans la *Boiler Insurance* dont nous avons parlé, et sur laquelle il nous faut maintenant revenir.

« La *Boiler Insurance et Steam Power Company* est, comme nous l'avons dit, une véritable société financière, fondée au capital de 6 500 000 francs, divisée en 50000 actions de 125 francs. Les actionnaires touchent, s'il y a lieu, des intérêts et des dividendes provenant, d'une part, du montant des cotisations payées pour les inspections, pour les visites extraordinaires et pour tous autres travaux ; et, d'autre part, des primes d'assurances. L'objet primitif de la Société était d'entreprendre les visites périodiques intérieures et extérieures des chaudières et de les assurer contre les explosions. Mais, depuis sa fondation, en 1859, la société a élargi successivement le cercle de ses opérations. En 1865, on ajouta à l'inspection et à l'assurance des chaudières leur entretien et leur réparation, avec le commerce de tout ce qui se rapporte aux appareils à vapeur ; on commença alors aussi à apporter quelque attention au travail des machines et à l'économie du combustible, et par suite on se mit à relever les diagrammes. En 1872, avec la cherté du combustible, ces dernières opérations se sont multipliées, et en même temps la Compagnie entreprit l'assurance des machines contre toutes ruptures entraînant détresse ou arrêt. Mais, en 1878, la Compagnie a renoncé à cette branche particulière d'opérations, par suite des difficultés que soulevait, dans l'application, la question de savoir dans quel cas l'assurance était acquise.

« Le tarif est, pour l'inspection périodique seule des chaudières, de 25 francs par chaudière et par an, moyennant quoi on a droit à une visite intérieure et à deux visites extérieures. Pour assurance, y compris inspection périodique, la Société prend de 20 schillings à 12 schillings 1/2 par 100 livres et par an de la somme assurée, suivant que cette somme varie de 200 à 1000 livres. Si la somme assurée est moins de 200 livres, la prime est de 25 schillings par 100 livres.

1. A la fin de 1887, le nombre des chaudières inspectées était de 4864.

« Tout récemment, la Société a entrepris l'assurance par batteries, qui consiste à assurer une certaine somme payable à l'explosion d'une quelconque des chaudières de la batterie; pour des chaudières de première classe, suivant que leur nombre varie de 2 à 20, et le montant de l'assurance de 200 à 500 livres, la prime varie de 3 l. sterl. 5 sh. à 43 livres sterling.

« En tout état de cause, la Société ne se charge d'ailleurs des chaudières qu'après les avoir soumises à un examen complet, et seulement après un mois de marche.

« Cette Société, dont les opérations dans le début n'avaient pas dépassé les districts manufacturiers du Lancashire et du Yorkshire, étend aujourd'hui son action sur toute l'Angleterre, et a des inspecteurs en résidence fixe dans les principales villes industrielles. Actuellement, elle ne doit pas avoir moins de 23000 chaudières sous sa surveillance.

« D'après ses comptes rendus, le nombre des visites intérieures faites annuellement aurait été, dans ces dernières années, de 40 % environ du nombre total des chaudières, et le nombre des visites extérieures de 3 par chaudière. En 1876, on a relevé jusqu'à 3599 diagrammes.

« Le succès de cette Société provoqua, quelques années après, la fondation de deux nouvelles sociétés semblables, la *Midland Steam Boiler inspection and Insurance Company* et la *National Boiler Insurance Company*. »

Nous ne croyons pas devoir entrer dans plus de détails sur les autres compagnies anglaises, que leur caractère de sociétés financières, de compagnies d'assurances, ayant un capital à rémunérer, rend par trop différentes des associations proprement dites.

Ces compagnies ont été et sont encore vivement attaquées en Angleterre. Nous n'avons pas à examiner si les attaques dirigées contre elles sont plus ou moins fondées. Nous constaterons seulement, en passant, qu'il existe entre ces compagnies d'une part, et l'Association de Manchester et les associations similaires du continent d'autre part, une différence fondamentale, qui est la suivante :

Dans les premières, le service technique ne peut être qu'un rouage, une branche du service qui est nécessairement au second plan. Dans les secondes, le service technique n'est pas seulement prépondérant, il est unique.

L'ingénieur en chef est en même temps le directeur, sous le contrôle du conseil d'administration. Personne ne lui demande de faire des économies, et nous estimons que son devoir est de consacrer la presque totalité des ressources de l'association à perfectionner son service, à rendre les inspections plus nombreuses, à faire des expériences d'utilité générale et à se tenir en communication fréquente avec les membres de l'association, en les tenant au courant de toutes les questions qui peuvent les intéresser.

En un mot, il doit rendre chaque année aux industriels le maximum de services en échange de leurs cotisations.

Les excédants des recettes sur les dépenses, destinés à constituer des réserves, doivent être réduits au minimum compatible avec une bonne administration, et les réserves, dès qu'elles sont suffisantes, doivent être considérées comme un fonds disponible pour des expériences ou des études d'intérêt général.

Cette appréciation sur la manière de conduire et d'administrer les Associations est, croyons-nous, celle de tous nos collègues, et ne nous paraît pas compatible avec la préoccupation de distribuer des dividendes.

Toutes les associations qui se sont établies sur le continent ont pris pour exemple la *Steam users Association*, de Manchester ; aucune d'elles n'a suivi les errements des autres compagnies anglaises.

La première association sur le continent a été l'Association alsacienne, fondée à Mulhouse en 1867. Cette association s'établissait dans des conditions exceptionnellement favorables. Elle était patronnée par cette grande Société industrielle de Mulhouse, à laquelle nous devons les premières études sérieuses faites sur la combustion de la houille et sur la production économique de la vapeur. Elle était dirigée à son début par M. Meunier-Dollfus, collaborateur, depuis plusieurs années, de M. Scheurer-Kestner dans ses savantes études. Sa voie était toute tracée. Elle avait à organiser l'inspection des chaudières au point de vue de la sécurité, et à continuer, au point de vue de l'économie de combustible, les travaux et les études depuis plusieurs années à l'ordre du jour en Alsace.

En 1870, l'Association alsacienne comptait déjà plus de 600 chaudières inscrites, et, depuis cette époque, les difficultés que lui créait sa situation géographique n'ont pas arrêté son développement. Elle surveillait, en 1888, 1806 chaudières en Alsace-Lorraine et dans le Grand-Duché de Luxembourg, et 933 chaudières en France. Les travaux de l'Association alsacienne sont pour ainsi dire classiques, ils ont servi de modèle et de point de départ aux travaux de toutes les autres associations. A l'association de Manchester revient l'honneur de la première organisation du service d'inspection pour les chaudières, au point de vue de la sécurité, mais l'Association alsacienne l'a précédée dans la voie des essais au point de vue économique, et c'est à elle que l'on doit l'extension du service d'inspection aux machines à vapeur.

En 1868, l'Association badoise s'organisait à Mannheim. L'Association suisse s'établit à Zurich en 1869, puis, chaque année, de nouvelles Associations se fondent en Allemagne, en Autriche, en Belgique et enfin en France, où l'Association des Propriétaires d'appareils à vapeur du Nord de la France débute à Lille en 1873.

Nous donnons plus loin la liste des Associations françaises.

Toutes ces associations ont adopté, à très peu de chose près, les statuts de l'association alsacienne et son organisation, que nous allons rappeler en quelques mots.

Un conseil d'administration, dont les membres sont élus par l'assemblée gé-

nérale des sociétaires, administre l'association. Il nomme et révoque l'ingénieur-directeur et les agents.

L'ingénieur-directeur dirige les travaux de l'association sous le contrôle du conseil d'administration.

Des ingénieurs adjoints et des inspecteurs le secondent pour tous les détails du service.

Le budget des associations est alimenté par les cotisations annuelles et par les recettes extraordinaires provenant des essais de toute nature et des projets d'installations faits pour les sociétaires.

La prospérité de presque toutes les associations montre combien l'idée qui a présidé à leur fondation était juste.

Celles qui périclitent, et elles ne sont pas nombreuses, sont celles qui se sont établies dans des régions où l'industrie n'est pas assez répandue et où la matière manque à leur développement.

Nous pouvons dire que toutes les associations établies dans des régions suffisamment industrielles ont réussi, sinon rapidement (les meilleures institutions ne sauraient se passer du temps), mais sûrement et sans à-coups.

Ces quelques généralités sur les associations nous paraissaient nécessaires avant d'entrer dans notre véritable sujet :

« Progrès réalisés par les associations de propriétaires d'appareils à vapeur. »

Ces progrès peuvent être envisagés à un double point de vue, sécurité et économie.

1^e SÉCURITÉ

Les associations assurent, dans la limite du possible, la sécurité des appareils en les faisant visiter, deux fois par an, par des inspecteurs expérimentés.

L'une de ces inspections (visite intérieure) est complète, tant intérieure qu'extérieure ; l'autre est extérieure seulement. La visite intérieure, dont l'importance est capitale, a pour objet de découvrir les défauts des tôles et des rivures, et en général tous les vices cachés qui, laissés inaperçus, peuvent donner lieu à des accidents graves.

Ce sont les visites intérieures qui nous permettent de signaler, avant qu'ils deviennent dangereux, les défauts dont vous avez vu les spécimens dans l'exposition des associations françaises.

Corrosions intérieures et extérieures, cassures, fentes, pailles ou dédoublements de tôles, bosses, etc.

Les visites intérieures permettent également de relever des défauts de montage qui peuvent être dangereux, comme par exemple : les ciels d'air dans les bouilleurs et dans les réchauffeurs, les mauvaises dispositions des tuyaux d'alimentation, les niveaux d'eau tracés à des hauteurs défectueuses, etc.

La visite extérieure a aussi son importance, c'est une vérification des appareils d'indication et de sûreté, tels que niveaux d'eau, manomètres, soupapes, etc. Elle est aussi une leçon de chauffage et de conduite des appareils, l'inspecteur profitant de cette visite pour signaler au chauffeur tout ce qu'il peut y avoir de défectueux dans la marche des appareils qui lui sont confiés.

C'est aussi généralement au moment des visites extérieures que l'inspecteur examine l'état d'entretien des machines à vapeur et peut faire au chauffeur des recommandations utiles au sujet de cet entretien.

Les tableaux 1 à 10, pages 33 à 42, indiquant pour toutes les Associations françaises le nombre des visites faites en 1888, montrent suffisamment que leur service est effectif et que le nombre des visites annuelles est assez grand pour assurer la sécurité dans les limites du possible.

Ces associations sont arrivées à faire annuellement les visites complètes de 66 à 90 % des chaudières inscrites, de manière à ne jamais laisser un trop grand intervalle entre deux visites consécutives (colonne 7). La colonne 6 montre que la plupart des chaudières qui n'ont pas subi la visite complète pendant l'année ont du moins été visitées extérieurement. Enfin, les colonnes 3, 4 et 5 donnant le nombre total des visites, permettent de constater que ce nombre est toujours bien supérieur à celui des visites de chaudières distinctes et qu'un certain nombre de chaudières sont visitées plusieurs fois dans l'année.

Cette comparaison montre que si un certain nombre de chaudières échappent chaque année à la visite intérieure, la faute n'en est pas aux associations, mais bien aux industriels qui oublient de la demander au moment des nettoyages.

Si nous ne réclamions pas avec persistance aux oublious les visites en retard, nous n'arriverions certainement pas à visiter annuellement 50 % des chaudières inscrites. Ce n'est qu'à force de lettres de rappel que nous sommes arrivés, à l'association lyonnaise, à dépasser, en 1888, la proportion de 90 % des chaudières inscrites.

Nous avons résumé dans un seul tableau, n° 11, page 43, les tableaux de 1 à 10, de manière à présenter un tableau d'ensemble des opérations des associations françaises en 1888.

Vous voyez que le nombre total des chaudières inscrites aux dix Associations était en 1888, de 9993 chaudières, réparties dans 47 départements.

Le nombre des chaudières en France étant de 66404, d'après la statistique des Mines, nécessairement incomplète, nous pouvons conclure que l'action des associations ne s'étend pas à plus de 15 % des chaudières existantes.

Ces visites périodiques peuvent elles assurer la sécurité absolue des appareils et les associations peuvent-elles éviter tous les accidents ?

Certainement non ! Messieurs, elles ne peuvent malheureusement avoir cette prétention, et cela pour plusieurs raisons. D'abord le personnel des associations n'est pas parfait et il devrait l'être. Nos inspecteurs devraient tout savoir et tout

voir. Les qualités que doit avoir un bon inspecteur ne sont pas faciles à trouver.

Un inspecteur doit être consciencieux, s'intéresser à son travail, bien connaître les chaudières qu'il visite et avoir une grande expérience du métier.

Ce serait en effet une erreur de croire qu'un bon ouvrier chaudronnier est apte à faire une bonne visite de chaudière. Il saura faire une bonne réparation d'un défaut qui lui est signalé; neuf fois sur dix il passera à côté d'un défaut sans le voir, d'abord parce que les défauts analogues qu'il a pu déjà avoir à réparer ne se présentent pas en place sous le même aspect qu'à l'atelier, et ensuite parce qu'il ne sait pas où les chercher.

Mais admettons que nous avons le meilleur des inspecteurs, il peut certainement laisser des défauts inaperçus par l'excellente raison que certains d'entre eux sont presque invisibles. Nous avons vu des cassures en pleine tôle dont nous connaissons l'existence et que nous avions beaucoup de peine à retrouver, sur une pièce détachée, parfaitement propre et bien exposée à la lumière.

Des défauts aussi difficiles à constater sont très rares, mais il suffit que nous en ayons remarqué quelques-uns pour que nous soyions obligés d'admettre qu'on peut passer à côté et même les regarder sans les voir.

Ajoutons à cela que bien souvent les inspecteurs ont à visiter des chaudières insuffisamment nettoyées dont les défauts peuvent être masqués par des dépôts calcaires ou de la rouille, et vous comprendrez qu'un certain nombre de défauts peuvent échapper à une inspection même bien faite.

Lorsqu'il y a lieu, nous signalons les inconvénients du manque de propreté, nous faisons nos réserves sur les défauts cachés, mais ces défauts n'en existent pas moins et leurs redoutables effets n'en sont pas moins à craindre.

Il y a donc des défauts qui peuvent échapper à l'examen le plus attentif, je disais tout à l'heure que ces défauts sont rares, vous avez compris avant que je l'aie dit que ces défauts sont plus rarement encore dangereux. En effet, une cassure de tôle, par exemple, qui n'a pas perdu, a rarement une grande étendue et met rarement en question la sécurité d'une chaudière lorsque les visites ne sont pas trop écartées.

Il est peut-être intéressant de chercher à nous rendre compte dans quelles limites des visites bien faites peuvent assurer la sécurité ?

Les données que nous fournit la statistique ne sont ni assez nombreuses, ni assez anciennes et ni assez exactes pour que nous puissions établir des chiffres précis. Nous pouvons cependant essayer de nous en rendre compte en examinant les causes des explosions de générateurs en France dans les cinq dernières années (1883 à 1887).

(Voir tableau n° 12, page 44).

Nous avons divisé ces explosions en trois catégories. Celles comprises dans la première catégorie (colonnes 3, 4 et 5) peuvent être évitées par des visites bien

faites, les défauts qui les ont produites étant apparents pour un observateur attentif.

Celles de la deuxième catégorie ne sont pas dans le même cas, nous avons à distinguer : 1^o les vices de construction (colonne 6). Ces vices de construction sont de différentes natures, les uns peuvent être constatés, ce sont ceux qui proviennent de fautes de dessin, tels qu'appareils mal combinés, mal disposés, défauts de montage, ciels d'air, défauts d'armature, manque d'épaisseur de tôle. D'autres tels que le défaut de qualité suffisante des matériaux nous échappent à première vue et ne se révèlent à nous que par leurs conséquences. En général, ces conséquences se manifestent par des symptômes caractéristiques avant de produire des résultats funestes.

Une partie de ces défauts peuvent être constatés dans nos visites, nous pouvons donc espérer éviter une bonne partie des explosions indiquées colonne 6. Nous pouvons surtout arriver à les prévenir par notre intervention dans l'installation des chaudières neuves, en prescrivant dans les cahiers des charges que nous fournissons aux industriels, les qualités de tôles nécessaires, en rejetant les dispositions vicieuses, en imposant enfin aux constructeurs des précautions qui paraissent élémentaires, mais qui sont trop souvent négligées.

2^o Manque d'eau imputable à la négligence du chauffeur ou dont les causes ne sont pas indiquées (colonne 7). — Nous pouvons encore avoir une certaine influence sur ces explosions, en faisant tenir en bon état les appareils d'alimentation et de niveau d'eau.

Presque tous les chauffeurs craignent beaucoup le manque d'eau. Ils admettent tous que les chaudières font explosion quand l'eau manque. Tandis que beaucoup d'entre eux admettent difficilement les autres causes d'explosions plus nombreuses, qui leur échappent. En général, les chauffeurs tiennent bien leur niveau lorsque les appareils leur donnent des indications exactes. Nous avons plus de peine à les empêcher de tenir trop d'eau dans les chaudières qu'à obtenir qu'ils en aient assez.

Nous croyons, pour ces raisons, être au-dessous de la vérité en disant que notre influence peut nous amener à empêcher la moitié des explosions de la deuxième catégorie.

Nous ne pouvons par contre avoir qu'une action indirecte sur les explosions classées dans la troisième catégorie et dues à l'imprudence des chauffeurs.

Cette action n'est cependant pas négligeable, car nous avons certainement réussi à améliorer dans une certaine limite l'éducation des chauffeurs, soit par les concours de chauffeurs, soit par des leçons de chauffage sur place, soit par des cours du soir, soit par les conseils de nos inspecteurs. Pour ne pas exagérer l'importance de nos services, et pour rester en dessous de la vérité, laissons de côté les explosions de la troisième catégorie, et disons que l'action des associations aurait pu éviter $55 + \frac{63}{2} = 86$ explosions sur 123, c'est-à-dire plus des 2/3

des explosions. Notre conviction est que nous pouvons davantage, mais si nous considérons que les 123 explosions des cinq dernières années ont coûté la vie à 151 ouvriers et occasionné des blessures sérieuses à 156, nous voyons qu'en moyenne les explosions de chaudières à vapeur tuent annuellement 30 hommes et en blessent 31. L'espoir de réduire ces chiffres de plus des deux tiers est bien fait, on l'avouera, pour nous encourager dans nos efforts.

L'examen que nous venons de faire nous montre bien le but à atteindre, mais il n'indique nullement jusqu'à quel point les associations s'en rapprochent en réalité.

L'insuffisance des statistiques ne nous permet pas de donner des chiffres précis, mais nous pouvons examiner ce qui s'est passé dans le service des associations ou du moins de l'une d'elles, vous voudrez bien m'excuser si je prends pour exemple l'association lyonnaise, qui a terminé en 1888 son 13^e exercice, et sur laquelle j'ai naturellement les renseignements les plus complets.

Si nous additionnons les nombres des chaudières surveillées pendant nos treize premiers exercices, nous trouvons le chiffre de 8457, nous pouvons donc dire que notre service depuis l'origine équivaut à la surveillance pendant une année de 8457 chaudières. Nous avons eu deux explosions, soit une explosion sur 4228 chaudières.

Les causes de ces explosions ont été pour l'une, un manque d'eau; les appareils d'alimentation étant parfaitement en état, le chauffeur chargé d'alimenter deux chaudières d'une batterie, alimenta constamment dans la seconde en laissant la première manquer d'eau. Pour l'autre, un vice de construction; nous avions, à la visite intérieure qui a précédé l'explosion, recommandé le remplacement d'un réchauffeur avarié. Le constructeur, que nous n'étions pas chargé de surveiller, fit couler la tête en ménageant dans la fonte les trous pour les rivets. Il en résulta un décollement de la tête en fonte sur les deux tiers de la circonférence. La chaudière fut mise en feu sans que nous en ayions été avisés et sans que nous ayions pu visiter le réchauffeur neuf dont la tête se détacha après quelques jours de marche.

Les deux explosions que nous avons eues chez les membres de l'Association lyonnaise ne peuvent donc en aucune façon être attribuées à un manque de surveillance des agents de l'association.

L'examen des dossiers des autres associations donnerait probablement des résultats analogues.

Si nous admettons pour le nombre des chaudières en France le chiffre de 66404 donné par l'administration des mines pour l'année 1887, et le nombre de 25 explosions pour cette même année, nous voyons que la moyenne générale indiquerait une explosion pour 2656 chaudières au lieu d'une explosion pour 4228 chaudières que donne notre moyenne particulière.

Nous avons dit que les chiffres de la statistique sont très incertains, en effet,

nous trouvons à chaque instant des chaudières qui n'ont jamais été déclarées et qui ne figurent pas sur la statistique de l'administration des mines, de sorte que le chiffre de 66404 chaudières en France (chaudières de bateaux et de locomotives non comprises), est certainement trop faible.

Par contre le chiffre des explosions est certainement réduit dans une proportion beaucoup plus grande encore que le nombre des chaudières.

Si dans les grands centres comme Paris la rupture d'un tube de chaudière est soigneusement signalée, il est loin d'en être de même en province, surtout dans les régions éloignées des chefs-lieux.

On peut dire qu'en dehors des lieux de résidence des gardes-mines, l'administration n'a guère connaissance que des explosions ayant causé mort d'homme ou des dégâts tellement considérables qu'elles ne peuvent être dissimulées. Pour les autres, l'industriel répare l'avarie le plus rapidement qu'il peut et continue à marcher.

En outre il arrive souvent que des accidents graves sont ou ne sont pas considérés comme explosions suivant les régions. Ainsi les ruptures des boulons trop souvent uniques qui fixent les tampons de lavage des chaudières à un foyer intérieur, ne sont pas toujours considérées par l'Administration, comme des explosions et deux de ces accidents ayant chacun causé la mort du chauffeur dans la région Lyonnaise ne sont point portés sur ses listes.

Dans ces conditions nous ne nous avançons pas trop en disant que la statistique exacte nous serait beaucoup plus favorable.

II. — ÉCONOMIE

La première des économies que les associations font réaliser à leurs membres porte sur les réparations.

Les inspecteurs signalent les moindres fuites avant qu'elles aient produit des avaries sérieuses, et bien souvent une réfection de joint ou un simple mattage faits à temps évitent le remplacement ultérieur d'une feuille de tôle entière.

Souvent la correction d'un défaut de montage amène le même résultat, et en plus de la sécurité, donne lieu à une économie sur l'entretien.

Une autre économie est souvent réalisée sur la consommation du combustible par la simple réfection d'une maçonnerie mal faite ou par une modification de montage insignifiante.

Nous avons souvent trouvé des réchauffeurs dont la sortie d'eau était tellement mal disposée qu'ils restaient à moitié pleins d'air et que la moitié de leur surface de chauffe se trouvait ainsi perdue.

Nous pouvons même citer un cas où les réchauffeurs se trouvaient dans un

carneau qui n'avait aucune communication avec la circulation des gaz de la combustion ; avant notre visite ils n'avaient jamais été chauffés.

Lorsqu'il s'agit de faire des installations de nouvelles chaudières, l'avis des associations, basé sur la qualité de l'eau, la nature de l'industrie, l'emploi de la vapeur, peut avoir une influence très utile sur le choix du système à préférer.

Les cahiers des charges établis par les associations prescrivant dans la construction l'emploi de bonnes tôles, exigeant pour les piétements, les dômes, etc., les dispositions nécessaires pour éviter les fuites sur la chaudière, interdisant les dispositions que la pratique a reconnu dangereuses, imposant aux constructeurs la vérification des matériaux et des appareils en construction, assurent la bonne exécution des chaudières neuves et leur bon montage.

Les bons constructeurs n'ont qu'à y gagner, car en somme les associations se bornent à exiger de tous les constructeurs ce que font sans contrôle les constructeurs soigneux et elles empêchent que les chaudières mal construites soient préférées aux autres, à cause de leur bas prix, aux dépens de la sécurité et des économies de combustible.

L'augmentation de prix qui résulte nécessairement de nos exigences, est largement compensée par les économies sur l'entretien et sur le combustible.

Notre intervention dans l'installation des appareils neufs, a bien souvent pour résultat de faire monter des chaudières bien plus fortes que celles qui étaient projetées, c'est là en général un grand service à rendre aux industriels, car toutes les personnes au courant des questions de vaporisation savent que la vraie manière d'assurer la durée d'une chaudière en même temps que l'économie du combustible est de n'exiger qu'une production très modérée de vapeur par mètre carré de surface de chauffe.

Pour ce qui regarde les machines à vapeur, les conseils des associations sont peut-être plus utiles encore. Dans le cas d'une installation nouvelle il importe d'abord, de se bien rendre compte des besoins de l'usine et de déterminer aussi exactement que possible la force de la machine à construire.

Il faut ensuite avoir soin que le marché passé entre l'industriel et le constructeur soit établi dans des termes suffisamment clairs pour éviter toute contestation.

Enfin et surtout il y a lieu d'insister pour que la vérification de la consommation garantie par le constructeur soit faite. Cette vérification n'a pas toujours lieu, elle est cependant nécessaire, ne fût-ce que pour empêcher les constructeurs de donner les mêmes garanties de consommation pour les bonnes machines et pour les mauvaises dans l'espoir que l'exécution de leurs engagements ne sera pas contrôlée.

L'essai périodique des machines à l'indicateur de Watt, permet de voir dans quel état se trouvent les distributions de vapeur et d'éviter les surcroûts de consommation qu'entraînent toujours les défauts de réglage. Les essais à l'indica-

teur permettent aussi aux industriels de savoir dans quelles conditions de force travaillent leurs machines, et par conséquent si leurs machines motrices leur permettent d'augmenter leur matériel. Dans cet ordre d'idées nous avons eu souvent depuis que l'éclairage électrique a commencé à se répandre dans l'industrie, à déterminer si les machines d'une usine pouvaient fournir la force nécessaire.

Enfin les associations ont travaillé d'une manière efficace à l'instruction des chauffeurs, soit par les leçons de chauffage sur place, soit par des concours, soit par des cours du soir. Presque dans toutes les régions nous avons pu constater tant dans la manière de chauffer que dans l'entretien des appareils, des résultats très appréciables.

Nous sommes arrivés à ces résultats en restant dans de bons termes avec la grande majorité des chauffeurs, qui en général voient d'un bon œil nos inspecteurs et qui ont souvent recours à nous, pour obtenir des améliorations ou des réparations que leurs patrons accordent volontiers lorsque nous donnons un avis favorable.

Outre les progrès que nous avons pu réaliser par notre intervention directe, il en est un autre que nous pouvons aussi revendiquer. Nous travaillons à déraciner ce préjugé trop répandu encore dans l'industrie, que l'ingénieur n'est pas toujours un auxiliaire utile et que son intervention donne lieu à des dépenses non-justifiées.

Les bonnes relations suivies qui existent entre les industriels et les ingénieurs des associations, les bons résultats économiques indiscutables que nous obtenons, amènent les industriels à penser que les mêmes résultats peuvent être obtenus dans une autre voie, et loin de faire concurrence aux ingénieurs civils, nous avons eu bien souvent déjà la satisfaction de voir sur notre recommandation des ingénieurs appelés dans des usines dans lesquelles ils ne seraient certainement pas entrés si les ingénieurs des associations ne leur avaient pas ouvert la voie.

Enfin bien que ne nous occupant que de notre spécialité nous sommes quelquefois consultés par les sociétaires sur des questions spéciales à leur industrie. Nous ne sommes pas compétents pour leur donner des renseignements directs, mais nous pouvons assez souvent leur indiquer les personnes qui peuvent leur répondre et leur éviter ainsi des démarches et des recherches.

Nul doute que nous rendions ainsi aux industriels d'utiles services, qui sont du reste appréciés par nos sociétaires qui nous restent fidèles.

Ces services sont aussi appréciés par d'autres personnes qui sont loin de nous en savoir gré. Les constructeurs peu conscients qui spéculent sur l'ignorance de leurs clients pour leur vendre des appareils défectueux, certains inventeurs que nous gêrons souvent dans l'exploitation de prétendues nouveautés, les fabricants de désincrustants, les marchands de chaudières d'occasion, etc., n'ont évidemment pas à se louer de l'existence des associations.

Il est impossible qu'en accomplissant notre devoir strict qui est de renseigner

fidèlement nos sociétaires, dont nous sommes les ingénieurs conseils pour toutes les questions de chaudières et de machines à vapeur, nous ne lésions pas quelques intérêts.

Mais ces intérêts sont-ils toujours bien respectables ? Nous ne le pensons pas et le fussent-ils, nous estimons que nous n'aurions pas à en tenir compte.

Les industriels en fondant les associations n'ont eu en vue que leur intérêt qui est en même temps l'intérêt général.

Ils ont consenti d'une part à faire des sacrifices pour éviter des accidents redoutables, ce qui est fort sage, et d'autre part ils cherchent à rentrer dans leurs déboursés ou même à faire des bénéfices s'ils le peuvent, en économisant sur la consommation de combustible et sur l'entretien des appareils, ce qui est fort légitime.

Notre devoir est de les aider autant que nous le pouvons, à obtenir les résultats désirés, et nous y consacrons tout notre temps et tous nos soins.

Si les constructeurs ignorants et les fournisseurs malhonnêtes se plaignent des associations, nous les en remercions sincèrement, c'est là la meilleure recommandation que nous puissions désirer et la seule réclame sur laquelle nous compatissons.

En revanche les constructeurs sérieux nous rendent en général cette justice que nous faisons tous nos efforts pour tenir la balance égale entre tous, que nous ne nous inféodons à aucune maison, si importante qu'elle puisse être, que nous n'hésitons pas à donner tort à nos sociétaires dans leurs contestations avec les fournisseurs, quand nous pensons que ces derniers ont raison et que nous réussissons à éviter bien des accidents et bien des procès.

Ils savent que nos avis, s'ils ne sont pas infaillibles sont toujours désintéressés.

Ces témoignages, la confiance de nos sociétaires et la bienveillance de l'administration des Mines, nous permettent de croire que nous avons bien compris la pensée des éminents industriels et ingénieurs qui ont fondé les premières associations et nous encouragent à marcher résolument dans la voie qu'ils nous ont tracée et que nous croyons être celle du véritable progrès industriel.

TABLEAU N° 1. — Association Alsacienne, fondée en 1867.
Siège à Mulhouse (partie française).

DÉPARTEMENTS	NOMBRE TOTAL		NOMBRE DE VISITES DE CHAUDIÈRES			NOMBRE DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES			NOMBRE DES ESSAIS À LA PRESSE		
	des établis- sements des associés	des chaudières des associés	à l'exté- rieur seulement	à l'extérieur et à l'intérieur	Total	à l'exté- rieur seulement	à l'exté- rieur et à l'intérieur	Total	Officiels	Officiels non officiel	
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Doubs	26	99	147	81	228	15	81	96	4	1	
Meurthe-et-Moselle	67	307	507	249	756	63	228	291	12	16	
Haut-Rhin	20	59	103	36	139	20	36	56	2	2	
Haute-Saône	31	109	162	81	243	21	79	100	4	2	
Vosges	156	359	519	250	769	106	238	344	31	2	
Total	300	933	1438	697	2135	225	662	887	53	17	

Nombre de chaudières distinctes ayant subi la visite complète : 662 sur 933 chaudières inscrites, soit 71 %.

TABLEAU N° 2. — Association du Nord de la France, fondée en 1873.
Siège à Lille.

DÉPARTEMENTS	NOMBRE TOTAL		NOMBRE DE VISITES DE CHAUDIÈRES			NOMBRE DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES			NOMBRE DES ESSAIS À LA PRESSE		
	des établissements chaudières des associés	des associés	à l'extérieur seulement	à l'extérieur et à l'intérieur	Total	à l'exté- rieur seulement	à l'extérieur et à l'intérieur	Total	officiels	non officiels	
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Nord	672	2642	902	2045	2947	808	1834	2642	206	»	
Pas-de-Calais	62	229	57	188	245	49	180	229	30	»	
Meurthe-et-Moselle	15	145	60	156	216	36	109	145	7	»	
Somme	1	5	0	5	5	0	5	5	0	»	
Total	750	3021	1019	2391	3413	893	2128	3021	243	»	

Nombre de chaudières distinctes ayant subi la visite complète 2128 sur 3021 chaudières inscrites, soit 70 %

TABLEAU N° 3. — Association de la Somme, de l'Aisne et de l'Oise, fondée en 1874.

Siège à Amiens.

DÉPARTEMENTS	NOMBRE TOTAL		NOMBRE DE VISITES DE CHAUDIÈRES		NOMBRE DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES		NOMBRE DES ESSAIS À LA PRESSE		
	des établis- sements chaudières des associés des associés	2	à l'exté- rieur seulement	à l'extérieur et à l'intérieur	Total	5	6	7	8
Somme	150	411	420	386	809	59	348	437	7
Oise	83	203	210	171	381	36	165	201	1
Aisne	135	443	442	496	938	48	387	435	5
Pas-de-Calais	2	6	6	7	13	»	6	6	»
Totaux	370	1063	1081	1060	2141	143	906	1049	13
									119

Nombre de chaudières distinctes ayant subi la visite complète 906 sur 1063 chaudières inscrites, soit 84,8 %.

TABLEAU N° 4. — *Association Normande fondée en 1874.**Siège à Rouen.*

DÉPARTEMENTS	NOMBRE TOTAL		NOMBRE DE VISITES DE CHAUDIÈRES		NOMBRE DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES		NOMBRE DES ESSAIS A LA PRESSE				
	des établis- sements des associés	des chaudières des associés	à l'exté- rieur seulement	à l'extérieur et à l'intérieur	Total	à l'exté- rieur seulement	Total	officiels non officiels			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Calvados	11	19	11	17	28	3	14	17	2	2	2
Eure.	44	90	94	74	168	9	72	81	4	4	2
Eure-et-Loir.	6	20	17	23	40	1	13	14	0	0	2
Manche	1	2	2	2	4	0	2	2	0	0	2
Mayenne	1	2	2	2	4	0	2	2	0	0	2
Oise.	1	3	2	4	6	0	2	2	0	0	2
Orne	7	14	11	7	18	6	5	11	1	1	2
Seine-Inférieure	205	523	273	481	757	81	430	511	40	40	2
Totaux	276	673	412	613	1025	100	540	640	47	47	2

Nombre de chaudières distinctes ayant subi la visite complète : 540 sur 673 chaudières inscrites, soit 80 %

TABLEAU N° 5. — Association Parisienne, fondée en 1874. — Siège à Paris

DÉPARTEMENTS	NOMBRE TOTAL		NOMBRE DE VISITES DE CHAUDIÈRES			NOMBRE DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES			NOMBRE DES ESSAIS À LA PRESSE		
	des établis- sements des associés	des chau- dières des associés	à l'ex- érieur seulement	à l'ex- terior et à l'intérieur	Total	à l'ex- terior seulement	à l'ex- terior et à l'intérieur	Total	officiels	non officiels	
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Seine	300	769	3	638	3	3	3	586	3	25	
Seine-et-Oise.	33	109	3	107	3	3	3	89	3	2	
Seine-et-Marne	13	73	3	60	3	3	3	53	3	2	
Loiret	13	26	3	25	3	3	3	19	3	3	
Eure-et-Loir	9	19	3	15	3	3	3	14	3	1	
Yonne.	8	13	3	12	3	3	3	9	3	3	
Sarthe.	5	10	3	7	3	3	3	6	3	3	
Loir-et-Cher	2	4	3	4	3	3	3	4	3	3	
Indre-et-Loire	2	3	3	2	3	3	3	2	3	3	
Aisne	2	2	3	1	3	3	3	1	3	3	
Total	387	1028	1200	871	2071	3	3	783	3	30	

Nombre de chaudières distinctes ayant subi la visite complète : 783 sur 1028 chaudières inscrites soit 76 %.
Sur ces 1028 chaudières 941 seulement étaient en activité pendant l'exercice 1888.

TABLEAU N° 6. — Association Lyonnaise, fondée en 1876. — Siège à Lyon.

DÉPARTEMENTS	NOMBRE TOTAL		NOMBRE DE VISITES DE CHAUDIÈRES		NOMBRE DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES		NOMBRE DES ESSAIS A LA PRESSE			
	des établis- sements des associés	des chau- dières des associés	à l'ex- terior seulement	à l'ex- terior et à l'intérieur	Total	à l'ex- terior seulement	Total	officiels		
								non officiels		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rhône	182	514	590	574	41	463	504	40	11	
Isère	98	219	220	248	10	209	219	19	2	
Loire	59	237	226	251	12	213	225	8	2	
Ardèche	19	63	63	64	5	53	58	2	2	
Drôme.	14	29	27	29	2	27	29	3	3	
Saône-et-Loire	10	30	30	28	4	26	30	2	2	
Ain.	13	30	26	26	4	25	29	2	2	
Côte-d'Or.	4	24	29	17	7	16	23	2	2	
Jura	1	4	5	4	9	4	4	2	2	
Haute-Savoie.	4	5	2	5	7	5	5	2	2	
Savoie.	8	10	7	11	8	10	10	2	2	
Allier	3	118	91	117	6	110	116	1	1	
Nièvre	2	40	13	37	50	37	37	1	1	
Haute-Loire	2	2	1	2	3	2	2	2	2	
Totaux.	419	1325	1330	1413	2743	91	1200	1291	78	16

Nombre des chaudières distinctes ayant subi la visite complète : 1200 sur 1325 chaudières inscrites soit 90,6 %.

CONGRÈS INTERNATIONAL DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE

39

TABLEAU N° 7. — Association de l'Ouest, fondée en 1878. — Siège à Nantes.

DÉPARTEMENTS	NOMBRE TOTAL		NOMBRE DE VISITES DE CHAUDIÈRES			NOMBRE DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES			NOMBRE DES ESSAIS À LA PRESSE		
	des établis- sements des associés	des chau- dières des associés	à l'ex- érieur seulement	à l'ex- terior et à l'intérieur	Total	à l'ex- terior seulement	à l'ex- terior et à l'intérieur	Total	officiels	non officiels	
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Loire inférieure	109	294	213	217	430	57	200	257	1	2	
(Armateurs)	12	32	»	22	22	6	22	28	»	2	
Maine-et-Loire	27	58	67	45	112	15	39	54	2	2	
Mayenne	17	66	70	55	125	8	51	59	5	2	
Sarthe	17	54	61	30	91	12	28	40	2	2	
Ille-et-Vilaine	13	34	37	16	53	14	16	30	2	2	
Vendée	10	29	25	22	47	9	20	29	3	2	
Morbihan	9	26	30	18	48	2	18	20	2	2	
Finistère	3	8	4	4	8	2	4	6	2	2	
Indre-et-Loire	1	8	14	5	19	4	4	8	»	2	
Côtes-du-Nord	1	1	1	1	»	1	1	1	»	2	
Totalaux	219	610	522	434	956	129	403	532	15	2	

Nombre de chaudières distinctes ayant subi la visite complète 403 sur 610 chaudières inscrites, soit 66 %.

TABLEAU N° 8. — Association du Sud-Ouest, fondée en 1879. — Siège à Bordeaux

DÉPARTEMENTS	NOMBRE TOTAL		NOMBRE DE VISITES DE CHAUDIÈRES.		NOMBRE DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES		NOMBRE DES ESSAIS A LA PRESSE	
	des établissements des chaudières des associés	des chaudières des associés	à l'extérieur seulement	à l'extérieur et à l'intérieur	Total	à l'extérieur seulement	à l'extérieur et à l'intérieur	Total
	1	2	3	4	5	6	7	8
Gironde	61	183	271	151	422	33	133	166
Charente	22	82	76	77	153	3	67	70
Charente-Inférieure	4	8	8	8	16	0	8	8
Dordogne	2	2	2	2	4	0	2	2
Lot-et-Garonne	1	12	12	12	24	0	12	12
Haute-Garonne	5	19	16	15	31	1	15	16
Basses-Pyrénées	3	51	44	37	81	7	44	51
Landes	1	3	3	3	6	0	3	3
Haute-Vienne	3	4	3	2	5	1	3	4
Totaux	102	364	435	307	742	45	287	332
								30
								9

Nombre de chaudières distinctes ayant subi la visite complète : 287 sur 364 chaudières inscrites, soit 79 %.

TABLEAU N° 9. — Association du Nord-Est, fondée en 1882.
Siège à Reims.

DÉPARTEMENTS	NOMBRE TOTAL		NOMBRE DE VISITES DE CHAUDIÈRES		NOMBRE DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES		NOMBRE DES ESSAIS A LA PRESSE	
	des établissements des chaudières	des associés	à l'extérieur	à l'intérieur	Total	à l'extérieur et à l'intérieur	Total	officiels non officiels
			seulement	seulement				
	1	2	3	4	5	6	7	8
Marne	91	263	203	98	496	19	227	246
Ardennes	28	98	61	122	188	22	68	90
Meuse	5	15	12	12	24	4	9	13
Aube	23	52	69	46	115	14	34	48
Haute-Marne	6	52	51	36	87	11	35	46
Aisne	2	5	2	2	4	1	2	4
Totalaux.	155	485	398	511	909	71	375	446
								34
)

Nombre de chaudières distinctes ayant subi la visite complète : 375 sur 485 chaudières inscrites, soit 77 %.

TABLEAU N° 10. — Association du Sud-Est, fondée en 1885.

Siège à Marseille.

DÉPARTEMENTS	NOMBRE TOTAL		NOMBRE DE VISITES DE CHAUDIÈRES			NOMBRE DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES			NOMBRE DES ESSAIS A LA PRESSE		
	des établissements	des chaudières des associés	à l'extérieur et à l'intérieur seulement	Total	à l'extérieur seulement	à l'extérieur et à l'intérieur	Total	officiels	non officiels	Total	8
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Alpes-Maritimes.	7	22	24	16	40	7	15	22	1	3	
Bouches du Rhône	90	388	315	302	617	3	295	295	18	3	
Gard	3	53	48	47	95	3	47	47	6	3	
Vaucluse	6	22	17	15	32	1	14	15	0	3	
Var.	1	6	6	7	13	2	4	6	1	3	
Totaux.	107	491	410	738	797	10	375	385	26	3	

Nombre de chaudières distinctes ayant subi la visite complète : 375 sur 491 chaudières inscrites, soit 76,4 %.

TABLEAU N° 11. — Tableau d'ensemble des opérations des Associations Françaises de propriétaires d'appareils à vapeur en 1888

DÉSIGNATION DE L'ASSOCIATION	SIÈGE	ANNEXE	NOMBRE TOTAL		DES VISITES DE CHAUDIÈRES		DE CHAUDIÈRES DISTINCTES VISITÉES		ESSAIS PAR PRESSION HYDRAULIQUE	
			des associations	des établissements de la fondation	à l'examen et à l'interdiction	seulement à l'examen et à l'interdiction	Total	à l'examen et à l'interdiction et à l'intervention	Total	officielles
Alsacienne (partie française).	Mulhouse	1867	300	933	1438	697	2135	225	782	887
du Nord de la France.	Lille	1873	750	3021	1019	2394	3413	893	2128	3021
de la Somme, de l'Aisne et de l'Oise.	Amiens	1874	370	1063	1081	1060	2141	143	906	1049
Normande.	Rouen	1874	276	673	412	613	1025	100	540	640
Parisienne.	Paris.	1874	387	1028	1200	871	2071	»	783	30
Lyonnaise.	Lyon.	1876	419	1325	1330	1413	2743	91	1291	78
de l'Ouest de la France.	Nantes	1878	219	610	522	434	956	129	403	532
du Sud-Ouest de la France.	Bordeaux	1879	102	364	435	307	742	45	287	332
du Nord-Est de la France.	Reims	1882	155	485	398	511	909	71	375	446
du Sud-Est.	Marseille.	1885	107	491	410	387	797	10	375	385
			3085	9993	8245	8687	16932			589
										161
En 1878 les 6 associations existantes n'avaient à surveiller que										
En 1888 les 10 associations existantes surveillent										
Augmentation en 10 ans										
2710 chaudières.										
En 1878 : 9993										
En 1888 : 7283										

TABLEAU N° 12. — *Relevé des Explosions en France de 1883 à 1887.*

ANNÉE	NOMBRE DES EXPLOSIONS	CAUSES DES EXPLOSIONS						CONSEQUENCES		
		PREMIÈRE CATÉGORIE			DEUXIÈME CATÉGORIE			TROISIÈME CATÉGORIE		
		Corrosions intérieures ou extérieures	Défaut d'entretien et de réparation	Manque d'eau imputable à des défauts des appareils	Vices de construction	Manque d'eau imputable au chauffeur ou sans indication dé- terminée	Impudence du chauffeur	TUÉS	BLESSES	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1883	123	26	2	4	0	8	12	0	38	59
1884	32	5	6	1	11	7	2	40	40	38
1885	15	2	5	2	2	3	1	30	30	28
1886	25	8	7	1	3	5	1	30	20	20
1887	25	3	6	3	7	5	1	13	11	11
Total		123	20	28	7	31	32	5	151	156
				55		63				

LES CHAUDIÈRES A PETITS ELEMENTS

à l'Exposition Universelle de 1889

PAR

A. OLRY

INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES

Avantage de l'emploi de la vapeur à haute pression. — L'expérience et la théorie démontrent qu'il est avantageux, au point de vue de la consommation du combustible, d'employer la vapeur à haute pression, à la condition de lui faire subir une forte détente dans les cylindres des machines, suivie d'une condensation dans des appareils appropriés.

Tel est le motif pour lequel on a vu se répandre, dans ces derniers temps toute une famille de machines dans lesquelles la vapeur, produite à une pression élevée, se détend successivement dans deux, trois, et même un plus grand nombre de cylindres. Personne n'ignore la faveur dont jouissent les machines compound ; si leur supériorité sur les machines à longue détente dans un seul cylindre est discutable en certains cas, il en est d'autres où elles se prêtent de la manière la plus satisfaisante aux conditions spéciales du travail qui leur est demandé.

Production de la vapeur à haute pression. Nécessité de la création de types spéciaux de générateurs. — Mais, quoi que l'on pense à ce sujet, il faut pouvoir, dans la pratique industrielle, se procurer à bon marché, et surtout sans s'exposer à des accidents graves, de la vapeur atteignant des pressions de 10, 12, 15 kilogrammes, et quelquefois plus.

Ce problème ne saurait être convenablement résolu au moyen des anciens types de générateurs. En effet, les chaudières à bouilleurs ou à réchauffeurs, les volumineuses chaudières à foyers intérieurs dites de Cornouailles, les chaudières à foyers extérieurs renfermant des tubes à fumée noyés dans la nappe d'eau, devraient alors avoir des parois très épaisses pour résister à la force élastique de la vapeur. Ces grandes épaisseurs entraîneraient des augmentations de poids énormes, surtout dans le cas des grands diamètres, et rendraient en même temps la transmission de la chaleur au travers des tôles plus difficile, et par suite, le générateur moins économique. Elles favoriseraient les avaries résultant de l'inégalité de température des diverses parties de l'appareil, c'est-à-dire la formation de fissures en pleine tôle ou dans les assemblages, en préparant ainsi les explosions.

Enfin, les conséquences des accidents de cette nature seraient particulièrement désastreuses, puisque la puissance destructive d'une chaudière qui éclate est proportionnelle à la quantité d'eau qu'elle renferme, et augmente avec sa température. Si l'on ajoute que les besoins de l'industrie moderne et le développement des installations de chauffage, de ventilation et d'électricité dans les villes, obligent de plus en plus à rapprocher les usines à vapeur des agglomérations humaines, et parfois à les placer au milieu de quartiers d'une population très dense, il faut bien reconnaître qu'il était urgent de faire appel à des idées nouvelles pour la construction des générateurs.

Principe de l'invention des chaudières à petits éléments. — Une première solution consiste à substituer aux types habituels les générateurs de locomotives ; mais ces appareils sont coûteux et exigent de grands soins ; ils sont difficiles à nettoyer ; de plus, s'ils permettent une certaine diminution de poids, en raison de ce que leur paroi extérieure n'est plus exposée aux avaries qui résultent de l'action des flammes, et de ce que leur volume est moindre, à surface de chauffe égale, si, à cause de cette réduction de volume, leur puissance destructive est notablement atténuée, elle n'en reste pas moins assez redoutable pour qu'il y ait lieu de rejeter leur emploi dans un assez grand nombre de cas.

Puisque les inconvénients et les dangers que je viens de signaler sont la conséquence de la grande quantité d'eau renfermée dans les générateurs, et des dimensions qu'elle entraîne pour eux, l'idée doit venir de chercher à produire la vapeur dans des appareils présentant une grande surface de chauffe sous une faible capacité, et composés d'éléments de diamètres très réduits.

Cette réduction de diamètre est un point extrêmement important. Dans les chaudières cylindriques, la fatigue du métal à l'extension est proportionnelle au diamètre lorsque l'épaisseur reste constante, ou, ce qui revient au même, est en raison directe du diamètre et en raison inverse de l'épaisseur. Dès lors, on pourra sans augmenter cette fatigue, diminuer l'épaisseur d'une quantité déterminée, à la condition de faire subir au diamètre une réduction proportionnelle. C'est ainsi qu'un tube de 0^m,10 de diamètre et de 5 millimètres d'épaisseur résistera aussi bien qu'une virole de 1 mètre de diamètre, épaisse de 5 centimètres. Et comme cette dernière épaisseur est pratiquement irréalisable, on voit qu'en fait, les chaudières de 1 mètre de diamètre n'atteignent jamais, à beaucoup près, la résistance des tubes de 0^m,10.

Imaginons maintenant un cylindre de 1 mètre de diamètre et de 1 mètre de longueur, et comparons-le à un autre de diamètre 10 fois moindre et de longueur 10 fois plus grande. Ils auront tous deux même superficie, mais le volume du second sera 10 fois plus faible que celui du premier. D'où il résulte que si l'on remplace une chaudière cylindrique par un serpentin de diamètre n fois plus faible et de longueur n fois plus grande, la surface de chauffe restera constante, et le volume

sera réduit au n^{me} . Comme, en outre, la fatigue du métal, étant données les épaisseurs pratiques des tôles et des tubes, sera moindre, ainsi que je l'ai démontré, dans le serpentin que dans la chaudière cylindrique, on voit que la substitution du premier à la seconde aura pour effet, en conservant la surface de chauffe, c'est-à-dire la puissance de vaporisation, de restreindre considérablement le volume, et comme conséquence le poids, l'appareil ayant, en outre, sa résistance améliorée.

Motifs de la préférence à donner aux générateurs à petits éléments, au point de vue de la sécurité. — Tel est le principe de l'invention des chaudières à petits éléments. Il consiste, en définitive, à opérer la vaporisation, non plus dans des vases de grands diamètres, mais dans des serpentins ou des faisceaux de tubes ayant en général de $0^{\text{m}},07$ à $0^{\text{m}},12$ de diamètre.

De cette façon, la résistance est augmentée dans de larges proportions, ce qui permet à l'appareil de supporter facilement de hautes pressions ; la diminution d'épaisseur permet une meilleure transmission de la chaleur au travers du métal ; enfin, ce qui est un point essentiel, le volume d'eau emmagasiné est beaucoup moindre, à surface de chauffe égale, et les conséquences des explosions se trouvent ainsi fortement atténuées.

La sécurité que procure l'emploi des générateurs à petits éléments résulte d'ailleurs, non seulement de leur faible capacité, mais encore et surtout de la répartition de l'eau et de la vapeur dans un grand nombre de tubes qui ne communiquent entre eux que par des raccords à section étroite. Cela étant, si une rupture vient à se produire, la difficulté de communication des diverses parties du générateur entre elles, en ralentissant considérablement l'écoulement du mélange fluide, enlève au phénomène l'instantanéité qui le rend si redoutable. Tout se borne à un écoulement d'eau et de vapeur, c'est-à-dire à une simple fuite plus ou moins abondante et plus ou moins prolongée. Il n'y a plus d'explosion proprement dite, plus d'effets destructeurs, plus de ces effrayantes catastrophes qui répandent au loin la mort et la ruine ; on n'observe souvent qu'un entraînement de vapeur par la cheminée ou un écoulement d'eau dans le foyer.

O'est pour cela que le règlement allemand du 29 mai 1871, et l'ordonnance du 3 novembre 1884, spéciale à l'Alsace-Lorraine, ont exonéré des conditions d'emplacement applicables à la généralité des chaudières celles qui consistent en tubes bouilleurs de moins de $0^{\text{m}},10$ de diamètre intérieur.

En France, aucune disposition générale n'a été prévue en faveur de ce genre d'appareils. Mais il est dans les traditions administratives de dispenser des conditions d'emplacement réglementaires, par mesures individuelles, ceux dans lesquels le faible volume et la grande division de l'eau donnent toute garantie pour la sécurité du voisinage. Du reste, à défaut même de dispenses ainsi accordées, la seule réduction de capacité de la chaudière, en la faisant descendre dans

l'échelle des catégories fixées par le règlement, lui donne, à ce point de vue, une supériorité notable sur les anciens systèmes de générateurs.

Inconvénients de la diminution du volume d'eau. Moyens d'y remédier. — La diminution du volume d'eau emmagasiné n'est pas, toutefois, sans présenter d'inconvénients quant à la régularité de marche de la chaudière. Il est plus difficile alors d'y maintenir le niveau à hauteur invariable, comme aussi d'obtenir une pression uniforme, quelle que soit la dépense de vapeur ; en même temps, on est plus exposé aux coups de feu. Dans quelques types de chaudières multitubulaires, telles que les chaudières Belleville, Oriolle, Bouron, etc., on a passé outre à ces difficultés ; on les a, d'ailleurs, efficacement combattues dans la chaudière Belleville, en réglant automatiquement l'alimentation à l'aide d'un flotteur, et la pression de la vapeur au moyen d'un appareil à ressort agissant sur le registre de la cheminée ; mais, dans la plupart des autres systèmes, on a jugé préférable de remplir entièrement d'eau le faisceau tubulaire et de remonter le niveau dans un ou plusieurs réservoirs supérieurs d'une capacité plus ou moins grande, soustraits — sauf exceptions — à l'action des gaz du foyer. De cette façon, les coups de feu sont moins à craindre, le niveau est plus stable, l'alimentation peut être intermittente, et l'on obtient un volant de chaleur qui limite les écarts de la pression ; les réservoirs qui contiennent la majeure partie de l'excédent de liquide sont à l'abri de l'action des gaz de la combustion ; il ne sont exposés qu'à très peu de causes d'avaries ; enfin, en cas de rupture d'un ou de plusieurs tubes, ce n'est jamais que la section de ceux-ci qui serait ouverte à l'écoulement des fluides, et cet écoulement resterait progressif ; on serait donc loin de la vérité si l'on pensait que le danger d'effets dynamiques se trouve augmenté dans les chaudières dont je parle, par rapport à la chaudière Belleville, dans la même proportion que le nombre des calories emmagasinées. Cependant, il faut bien reconnaître que l'addition de grands réservoirs partiellement remplis d'eau, est contraire au principe même des chaudières à petits éléments, et qu'il peut en résultter, en cas d'explosion, des effets dynamiques que ces chaudières ont précisément pour but d'éviter. A la vérité, de pareilles explosions sont peu probables, mais il est néanmoins prudent de compter avec elles ; d'autre part, si un tube vient à se déchirer, la quantité de fluides qui s'en échappera sera bien plus considérable, et les ouvriers seront plus exposés à être brûlés par l'eau et la vapeur.

Pour ces divers motifs, l'administration s'est toujours montrée beaucoup plus réservée, en matière de tolérance d'emplacement, à l'égard des chaudières de cette dernière classe, qu'à l'égard de celles où l'eau est exclusivement renfermée dans le faisceau tubulaire. Pour ma part, je n'hésite pas à donner la préférence à ces dernières, en tant que générateurs de sécurité.

Types nombreux de chaudières à petits éléments. — Ces préliminaires posés, je vais aborder l'étude sommaire des principales dispositions qui ont été

appliquées dans les chaudières à petits éléments. L'esprit des inventeurs s'est ingénier à les varier ; aussi, le nombre des types qui ont été offerts à l'industrie est-il considérable. Beaucoup disparaissent après une existence éphémère, et seuls subsistent ceux qui sont rationnellement établis, construits avec soin et en matériaux de bonne qualité, et qui, en outre, sont habilement présentés au public. La concurrence, de jour en jour plus active, qui s'exerce entre les divers systèmes en présence, la préoccupation incessante de trouver des combinaisons nouvelles et d'améliorer celles qui existent, sont d'ailleurs la meilleure preuve de l'utilité des générateurs multitubulaires dits inexplosibles, et viennent donner la consécration de leur succès.

Je ne saurais avoir la prétention de donner ici une description détaillée de la totalité, ni même seulement d'une grande partie des types connus ; le temps qui m'est imparti n'y suffirait pas ; je me bornerai donc à passer en revue ceux que j'ai eu l'occasion d'étudier personnellement, particulièrement à l'Exposition universelle, en les divisant en catégories d'après leurs caractères les plus essentiels.

Chaudières non comprises dans cette étude. — Tout d'abord, j'éliminerai, comme ne rentrant pas directement dans le cadre de cette conférence, les générateurs qui, à côté de faisceaux tubulaires, présentent des capacités relativement volumineuses directement soumises à l'action des flammes. Je range dans cette catégorie la chaudière Field à foyer intérieur et doubles tubes pendants, ainsi que ses dérivés immédiats tels que la chaudière Rocour, bien que cette dernière ait avantageusement substitué au foyer intérieur ordinaire, un système jointif de tubes à circulation d'eau, en faisant ainsi disparaître la plus grande partie de la surface de chauffe non tubulaire. J'y comprends également la chaudière « Le Hérisson », basée aussi sur l'emploi du tube Field, la chaudière Bordone à foyer intérieur, et même la chaudière de Dion, Bouton et Trépardoux, dans laquelle le faisceau de tubes est disposé circulairement entre une capacité annulaire verticale et un bouilleur central, tous deux remplis d'eau. Ces appareils sont bien conçus et méritent de fixer l'attention, mais ils ne se rattachent que par certains points aux chaudières proprement dites à petits éléments.

Définition usuelle des générateurs à petits éléments. — On désigne ordinairement de cette manière des générateurs essentiellement formés d'un faisceau de tubes plus ou moins inclinés, souvent divisé suivant des plans verticaux en un certain nombre d'éléments juxtaposés les uns aux autres et identiques entre eux. Les tubes sont réunis à leurs extrémités, dans chaque élément, ou dans le faisceau tout entier, par des communications, des collecteurs verticaux ou inclinés, ou des caisses de tôle entretoisées formant lames d'eau ; cette réunion est opérée fréquemment des deux côtés du faisceau, mais parfois elle ne l'est que d'un seul. Enfin, le groupe tubulaire est surmonté, en général, d'un ou de plusieurs réservoirs, où affleure souvent le niveau normal de l'eau.

Chaudières à serpentins. *Type Belleville.* — Parmi les types en usage en France, la chaudière Belleville est la seule où l'élément forme serpentin, et dans laquelle une bulle de vapeur produite à l'intérieur de l'un des tubes soit obligée de parcourir tous ceux qui se trouvent au-dessus pour se dégager. Le niveau de l'eau y est fixé à une certaine hauteur dans le faisceau tubulaire lui-même, et les éléments ne sont surmontés que d'un simple réservoir collecteur de vapeur.

Avec cette disposition, il est indispensable que l'arrivée de l'eau à la partie inférieure de chaque serpentin se fasse constamment en conformité exacte de la vaporisation, afin que la hauteur de la partie dans laquelle elle se transforme en vapeur ne soit ni trop forte, ce qui donnerait naissance à des entraînements exagérés de liquide, ni trop faible, ce qui pourrait occasionner des coups de feu. Un régulateur automatique d'alimentation assure l'afflux d'eau de manière à satisfaire à cette double condition.

Autres systèmes. Leur répartition en deux grandes classes. — Dans les autres systèmes, on s'attache à ce qu'une bulle de vapeur formée dans l'un quelconque des tubes, au lieu d'être obligée d'en parcourir d'autres, trouve une issue aussi directe que possible vers le haut de l'appareil. Les tubes y fonctionnent donc indépendamment les uns des autres, comme autant de petits générateurs distincts ; en même temps, le niveau de l'eau est presque toujours reporté dans le réservoir supérieur.

On peut diviser ces appareils en deux grandes classes, savoir :

1^o Ceux dans lesquels l'arrivée de l'eau d'alimentation et le dégagement de la vapeur se font aux deux extrémités des tubes ;

2^o Ceux dans lesquels cette arrivée et ce dégagement n'ont lieu que d'un seul côté.

Première classe. Ses subdivisions. — Les générateurs de la première classe se répartissent eux-mêmes en trois familles distinctes :

(A). — Chaudières divisées par des plans verticaux en éléments dont les tubes sont reliés de proche en proche par des communications. Telles sont les chaudières Root, de Naeyer, Lagosse et Bouché, Morelle. Dans ces divers types, les tubes sont tous parallèles entre eux ; ils débouchent à leurs extrémités, individuellement ou par groupes de deux, dans des boîtes que des communications réunissent dans le sens vertical. De cette façon, l'eau d'alimentation et la vapeur peuvent cheminer à l'avant et à l'arrière du faisceau dans une série de conduits plus ou moins sinueux, constitués par les boîtes et leurs communications. Dans les générateurs de Naeyer et Lagosse, il y a deux tubes par boîte ; il n'y en a qu'un dans les chaudières Root et Morelle. Les boîtes de ce dernier système ne sont pas distinctes de leurs communications ; elles s'empilent les unes sur les autres, assemblées par des boulons, et chaque joint ainsi constitué est traversé par un conduit qui fait corps avec les deux boîtes contigües. Les chaudières Root, de Naeyer et La-

gosse possèdent, au contraire, des communications indépendantes des boîtes, et réunies à celles-ci par des petits tubes en fer à joints précis et à emboîtement doublément conique.

(B). — Chaudières formées d'éléments de tubes assemblés des deux côtés par des collecteurs verticaux ou inclinés. A cette catégorie appartiennent les chaudières Babcock et Wilcox, Roser, Maniguet, Montupet, etc. Les tubes y sont encore parallèles ; cependant il y a des exceptions à cette règle : ainsi, dans le type Sinclair, ils forment deux groupes ayant des inclinaisons opposées. Chaque élément comprend une seule rangée verticale de tubes, comme dans les chaudières Babcock, Roser, Sinclair, ou deux, comme dans les chaudières Montupet et Maniguet ; il pourrait y en avoir un plus grand nombre.

(C). — Chaudières composées d'un faisceau de tubes débouchant à chaque extrémité dans un collecteur unique constitué par une caisse en tôle entretoisée formant lame d'eau. Les chaudières Oriolle, Mathot, Hanrez, Lagrafel et d'Allest, etc., sont dans ce cas. Le parallélisme des tubes est encore la règle générale, sauf exceptions, comme dans la chaudière Sinclair, type à lames d'eau, où le faisceau est divisé en deux parties d'inclinaisons différentes, les caisses étant disposées de manière à les recevoir perpendiculairement à leurs grandes faces.

Seconde classe. Emploi des tubes Field et systèmes divers. — Quant aux générateurs de la seconde classe, on peut d'abord y distinguer ceux qui reposent sur l'emploi du tube Field à circulation d'eau, couché dans une position à peu près horizontale. Je citerai notamment les chaudières Collet, Bouron, Dubuc et Bourgois. Dans la première, les tubes à circulation d'eau aboutissent à des collecteurs verticaux correspondant à autant d'éléments ; dans la seconde, ils sont implantés sur le parement d'un réservoir parallélépipédique formant le fond de la boîte à feu ; enfin, dans la troisième, qui est très peu répandue, on retrouve une disposition analogue à celle de la chaudière Collet, avec division en éléments verticaux, mais avec cette différence que les tubes successifs, au lieu d'être indépendants, communiquent entre eux, l'eau passant de chaque tube vaporisateur dans le tube directeur situé immédiatement au-dessous. Il ne faut pas oublier la chaudière Uhler, où les tubes Field sont remplacés par des tubes ordinaires fermés à un bout, mais partagés en deux compartiments égaux, l'un supérieur, l'autre inférieur, par des diaphragmes en tôle percés de quelques trous et s'arrêtant à une certaine distance de leurs extrémités libres.

La même classe comprend d'autres systèmes assez variés ; je n'en citerai que deux. D'abord, la chaudière Terme et Déharbe, où les tubes autres que ceux du coup de feu, répartis dans chaque élément en groupes de trois, dont deux inclinés dans un sens et un dans l'autre, aboutissent d'un côté à un collecteur vertical, et sont reliés de l'autre par des boîtes de forme appropriée, simplement superposées, le tout formant trois rangées verticales, avec inclinaisons opposées

pour celle du milieu et pour les extrêmes. Puis la chaudière Bourgois et Lencauchez, dans laquelle chaque élément comprend un bâillet divisé en deux compartiments par une cloison verticale, et des couples de tubes, inclinés en sens contraires, formant des sortes de fourches entre ces deux compartiments et reliés à leurs extrémités libres par des boîtes. Chaque bâillet est fermé par le bas et suspendu par le haut au réservoir d'eau et de vapeur. Sa cloison intérieure sépare le courant d'eau descendant vers sa base du courant ascendant de vapeur, mais est percée de fenêtres de communication permettant à l'eau chaude qui a déjà circulé dans l'un des couples de tubes de parcourir ensuite un couple plus élevé, plutôt que de se rendre directement au réservoir supérieur.

Tubes de retour de flammes. — En général, les tubes bouilleurs ne sont chauffés qu'extérieurement. Cependant, on y fait parfois passer un ou plusieurs tubes de retour de flammes. Cette disposition existe avec quatre tubes de retour dans une des variantes de la chaudière Maniguet, et avec un seul dans la chaudière Morelle et dans certains types de chaudières Roser et Bourgois.

Conditions que doit remplir un bon système de chaudière à petits éléments. — Les conditions que tout bon système de chaudière à petits éléments doit remplir, sont les suivantes :

- 1^o Sécurité ;
- 2^o Économie de combustible ;
- 3^o Économie de poids ;
- 4^o Économie de place ;
- 5^o Facilité de montage ;
- 6^o Facilité de conduite ;
- 7^o Facilité des nettoyages ;
- 8^o Économie dans l'entretien et facilité des réparations ;
- 9^o Production de vapeur sèche ;
- 10^o Régularité de marche ;
- 11^o Rapidité de mise en pression ;
- 12^o Économie dans le prix de premier établissement.

Je vais examiner successivement par quels moyens et dans quelle mesure ces divers résultats peuvent être obtenus dans la pratique. J'aurai ainsi l'occasion naturelle de comparer les types que j'ai énumérés, ou du moins les principaux d'entre eux, et d'indiquer les dispositions spéciales qui les caractérisent.

SÉCURITÉ

Supériorité des chaudières à faible réserve d'eau. — Relativement à la sécurité, je n'ai rien à ajouter à ce que j'ai dit précédemment. Pour qu'elle soit assurée d'une manière complète, il est nécessaire que la chaudière contienne un

faible volume d'eau et que cette eau soit renfermée dans des capacités exclusivement tubulaires. Sous ce rapport, la chaudière Belleville l'emporte sur les générateurs à réservoirs supérieurs d'eau et de vapeur. Parfois, comme dans les chaudières Babcock, et surtout dans les chaudières Mathot, le volume ainsi emmagasiné est important ; dès lors, si le réservoir venait à faire explosion, les effets dynamiques produits pourraient être considérables. Quelle que soit l'improbabilité d'un évènement de ce genre, le générateur cesse alors, à proprement parler, d'être inexplosible, et, de plus, en cas de rupture d'un tube, l'écoulement abondant des fluides augmente les chances de brûlure pour les chauffeurs.

ÉCONOMIE DE COMBUSTIBLE

Éléments qui influent sur la consommation de combustible. — La consommation de charbon dans les chaudières dépend de trois éléments principaux qui sont : la disposition du foyer, le mode de circulation des gaz de la combustion au contact des surfaces de chauffe, et la facilité plus ou moins grande d'absorption de la chaleur par ces surfaces.

Disposition du foyer. — La disposition du foyer est en quelque sorte indépendante du système de chaudière choisi. On peut, en effet, adapter des foyers différents à un type déterminé. L'étude que ce sujet comporte est donc distincte de celle dont je m'occupe, et peut être laissée ici de côté. Je me bornerai à mentionner qu'avec les chaudières à petits éléments, on peut faire usage soit du tirage naturel, soit du tirage forcé.

Mode de circulation des gaz du foyer. Moyens d'obtenir une combustion complète. — Le mode de circulation des gaz de la combustion au contact des surfaces de chauffe est, au contraire, un des points importants qui différencient les divers systèmes. D'une manière générale, les chaudières multitubulaires ont l'avantage de présenter, sous un faible volume, une très grande surface de chauffe qui est en quelque sorte plongée dans le foyer. On conçoit que cette disposition, qui serait irréalisable avec les chaudières ordinaires, soit particulièrement favorable à l'utilisation de la chaleur.

Mais encore faut-il que la combustion des gaz soit complète, par suite de leur mélange intime avec l'air, et que leur contact avec la superficie extérieure des tubes soit convenablement assuré, pour qu'ils puissent se dépouiller aisément de leur calorique. On obtient pratiquement ce double résultat en brassant la masse gazeuse au-dessus même du foyer à l'aide de jets de vapeur, et en rapprochant les tubes les uns des autres, de manière à forcer le courant à se laminer entre eux, ce qui favorise sa combustion, tout en l'obligeant à lécher les surfaces sur lesquelles il doit agir. Sous ce rapport, les chaudières à tubes débouchant dans des boîtes réunies par des communications indépendantes et démontables gagnent

à avoir deux tubes par boîte, comme dans les chaudières de Naeyer et Lagosse, plutôt qu'un seul, comme dans la chaudière Root ; il est plus facile, dans le premier cas, d'obtenir le rapprochement qui assure la bonne utilisation de la chaleur.

Dans le même ordre d'idées, il est avantageux de disposer les tubes en quinconce, parce qu'alors les gaz sont obligés de les contourner, et de circuler dans des conduits sinuieux où ils se brassent, en abandonnant leur calorique aux superficies environnantes. Le quinconçage des tubes est commode à réaliser dans le cas où ils aboutissent à des boîtes superposées ; il suffit alors de placer ces boîtes, dans des diverses rangées horizontales, un peu en retrait les unes par rapport aux autres. Il en est de même dans les chaudières à collecteur unique à chaque extrémité du faisceau tubulaire ; l'implantation des tubes dans les caisses formant lames d'eau peut toujours être faite en conséquence. Mais lorsqu'il s'agit de chaudières à éléments correspondant à des collecteurs verticaux ou inclinés, le problème est plus difficile, et on ne peut le résoudre complètement qu'en ondulant les collecteurs comme on l'a fait dans le type Babcock, ou bien encore en adaptant aux tubes, sur toute leur longueur, des ailerons métalliques qui obligent les flammes à les contourner, ce dont une variante du type Bourgois donne un exemple.

Enfin, la circulation des gaz au travers du faisceau tubulaire est réglée le plus souvent, dans son ensemble, par un système de cloisons formant chicanes, et disposées, d'après la longueur des tubes, leur nombre et leur inclinaison, tantôt horizontalement, tantôt verticalement, tantôt dans une position plus ou moins inclinée. Ces chicanes améliorent la répartition des gaz à l'intérieur du fourneau et y déterminent, en général, deux ou trois parcours de flammes.

La chaudière Maniguet offre une disposition qui mérite d'être citée, au moins à titre de curiosité. Le faisceau tubulaire y est divisé par une cloison transversale en deux parties correspondant à deux parcours des gaz. Dans celle d'avant, les tubes sont d'assez gros diamètre, mais, dans celle d'arrière, leur diamètre est beaucoup plus faible et leur nombre est quadruplé, c'est-à-dire que chaque gros tube se prolonge par quatre petits. On s'est proposé de cette manière de refroidir plus rapidement les gaz, dans leur second parcours, en raison de la multiplicité de leurs contacts avec les surfaces de chauffe.

Sécheurs de vapeur et réchauffeurs d'eau d'alimentation. — Pour abaisser encore davantage la température des gaz à l'entrée du carreau conduisant à la cheminée, on leur fait souvent chauffer un sécheur de vapeur disposé soit sous le plafond supérieur du fourneau, soit à côté de celui-ci, et constitué, d'habitude, par un serpentin ; celui de la chaudière Uhler consiste en un groupe de doubles tubes, analogues à des tubes Field. Dans quelques types, on fait en même temps lécher par les gaz la partie inférieure du réservoir d'eau et de vapeur ; c'est une disposition défectiveuse, car elle augmente les chances d'avaries de ce réservoir qui,

en cas d'explosion, pourrait donner lieu à des effets dynamiques d'une certaine intensité.

Un autre moyen d'utiliser la chaleur des produits de la combustion consiste à s'en servir, en dernier lieu, pour réchauffer l'eau d'alimentation, qui arrive alors par un serpentin ou par un faisceau tubulaire spécialement établi pour cet objet. Certaines chaudières Mathot comprennent de gros réchauffeurs verticaux faisant corps avec les réservoirs supérieurs ; l'eau alimentaire y pénètre par le bas.

Absorption de la chaleur par les surfaces de chauffe. Utilité des nettoyages. — Il ne suffit pas que les surfaces de chauffe soient habilement disposées ; il faut encore qu'elles puissent absorber facilement la chaleur. Pour cela, il convient, d'abord, qu'elles soient toujours tenues propres à l'intérieur et à l'extérieur.

Dans tous les systèmes, on a prévu le nettoyage intérieur des tubes, et on s'est arrangé de manière à le rendre aussi facile que possible. Le nettoyage extérieur ne doit pas non plus être négligé. Je reviendrai tout à l'heure sur ce sujet.

Rapidité de la circulation dans les tubes. — Une seconde condition essentielle à remplir est que les tubes bonilleurs soient constamment parcourus par un courant très actif d'eau et de vapeur. La circulation rapide des fluides favorise la prompte absorption de la chaleur, déjà facilitée par l'épaisseur relativement faible des tubes, et permet de bien utiliser la conductibilité du métal ; elle assure, en outre, une température relativement uniforme dans toutes les parties de la chaudière, et atténue, par conséquent, les inconvénients résultant des inégalités de dilatation.

Dans la chaudière Belleville, l'eau est distribuée aux divers serpentins, à haute température, par un distributeur horizontal qu'un tuyau vertical met en relation avec le réservoir supérieur de vapeur, dans lequel se fait l'alimentation ; quand, ensuite, cette eau se vaporise, chaque serpentin se trouve parcouru par la totalité de la vapeur formée dans les tubes qui le composent. Le faisceau tubulaire renferme donc, à vrai dire, un mélange d'eau et de vapeur dont la densité varie avec l'activité du feu, mais est, dans tous les cas, très inférieure à celle de l'eau de renouvellement amenée par le tuyau vertical extérieur. Cette grande différence dans les densités agit nécessairement de la manière la plus heureuse sur la rapidité de la circulation ; mais on reproche parfois à ce système de donner lieu à la formation de chambres de vapeur qui pourraient occasionner des coups de feu ; ce danger ne me paraît guère à craindre, à moins d'un feu d'une intensité tout à fait excessive, car la proportion de vapeur que l'eau renferme est relativement faible dans les tubes inférieurs qui sont les plus exposés à l'action du foyer ; elle augmente ensuite à mesure qu'on s'élève dans le faisceau, mais alors les tubes étant moins chauffés, leurs chances d'altération diminuent ; du reste, si une émulsion subite venait à soulever l'eau et à la transporter dans les tubes

supérieurs, l'inclinaison continue du serpentin la ramènerait rapidement vers la base du générateur. Ajoutons, enfin, que la vapeur dégagée entraîne avec elle un grand excès d'eau qui refroidit les tubes situés au-dessus du niveau normal, en utilisant leur surface de chauffe, et les empêche ainsi de se brûler. Cette eau, après avoir été recueillie dans l'épurateur disposé pour cet objet, revient dans les éléments avec l'eau d'alimentation. Une longue pratique a démontré l'efficacité de ce mode de circulation; l'eau pénètre régulièrement dans le bas des éléments en raison des besoins de leur vaporisation, et l'automoteur d'alimentation maintient, dans chacun d'eux, le niveau normal à une hauteur constante.

Dans les types où la surface libre du liquide se trouve dans le réservoir supérieur, et où la vapeur est dirigée vers ce réservoir à la sortie de chaque tube, sans parcourir les autres, la circulation n'est plus aidée dans la même mesure par le dégagement de la vapeur et par l'écart des densités qui en est la conséquence. Il faut alors combiner le système de façon que, dans le circuit complet constitué par le réservoir supérieur, le faisceau tubulaire, et les collecteurs qui les réunissent, l'action de la chaleur entraîne nécessairement un mouvement général de circulation du liquide dans un sens déterminé, abstraction faite de l'action de la vapeur produite. Le dégagement de cette vapeur doit d'ailleurs favoriser, et surtout ne jamais entraver la circulation du liquide; en d'autres termes, il ne doit jamais y avoir de conflit entre l'eau et la vapeur. La chaudière Collet est très bien conçue sous ce rapport. De même que toutes celles qui sont basées sur l'emploi du tube Field couché presque horizontalement, le mouvement de l'eau y est accéléré, en raison de la faible section qu'elle occupe entre les tubes bouilleurs et les tubes directeurs; il se produit là quelque chose d'analogue à ce qui existe dans la chaudière Belleville, parce qu'il se fait dans chaque intervalle une vaporisation assez importante relativement à l'espace disponible pour le dégagement des bulles. De plus, une cloison sépare, dans chaque collecteur vertical, le courant ascendant de la vapeur et de l'eau échauffée qui se meut dans le même sens, du courant descendant de l'eau de renouvellement. Dans la chaudière Uhler, au contraire, les diaphragmes dont les tubes sont pourvus ne paraissent pas assurer convenablement la circulation de l'eau.

Les tubes de retour de flammes, en diminuant la section offerte à l'échappement de la vapeur, produisent un effet analogue à celui des tubes Field; aussi diminue-t-on parfois leur diamètre dans les rangées inférieures, pour éviter les coups de feu; la chaudière Roser donne un exemple de cette particularité.

Par contre, l'entrée de l'eau d'alimentation et la sortie de la vapeur se font assez difficilement dans les chaudières où les tubes sont raccordés par des boîtes et des communications, à cause des étranglements et des changements brusques de direction qui résultent de ce mode de jonction. Dans la chaudière Lagosse, on a cherché à supprimer cette imperfection en donnant aux boîtes dans lesquelles les tubes débouchent une position inclinée se rapprochant beaucoup de la verti-

cale, ce qui atténue l'inconvénient des coudes, et en divisant le faisceau tubulaire en deux parties inégales, évacuant chacune leur vapeur dans un collecteur spécial disposé horizontalement.

La grande inclinaison des tubes améliore aussi la circulation de la masse fluide. C'est un des motifs pour lesquels on a donné au faisceau tubulaire une position presque verticale dans la chaudière Hanrez. Cette disposition s'oppose aussi à la formation des chambres de vapeur.

Enfin, par analogie avec ce qui existe dans la chaudière Belleville, on met souvent la base du faisceau tubulaire en communication par un ou plusieurs tuyaux avec le réservoir supérieur d'eau et de vapeur, où se fait alors l'alimentation. On améliore ainsi le circuit que le courant fluide parcourt; l'eau, injectée dans le réservoir, descend par ces tuyaux à un distributeur horizontal situé à la base du faisceau et sur l'un de ses côtés; elle s'élève, ensuite, dans les tubes inclinés en se transformant partiellement en vapeur, puis revient au réservoir du côté opposé, après avoir ainsi effectué un cycle complet. De cette façon elle accède d'abord aux tubes inférieurs, et le courant, pris dans son ensemble, suit une marche de même sens que les produits de la combustion. Cette combinaison est évidemment peu rationnelle, mais, en pratique, elle a peu d'inconvénient, puisque l'eau arrive déjà chaude dans le distributeur d'alimentation; de plus, lorsque les tubes sont longs et qu'il y a plusieurs parcours de flammes dirigées perpendiculairement à leur longueur, la circulation se fait ordinairement, dans chacun d'eux, en sens inverse de celle des gaz chauds. Dans la chaudière Dubuc, la disposition est différente; l'eau descend successivement d'un tube à un autre et, néanmoins, elle chemine dans les intervalles annulaires compris entre les tubes bouilleurs et les tubes directeurs dans le même sens que la vapeur: cette disposition est théoriquement satisfaisante, mais ses avantages sont rachetés par une assez grande complication de l'appareil.

Il ne faut pas perdre de vue: 1^o que l'écoulement de la vapeur vers le haut de la chaudière doit toujours se faire assez facilement pour qu'elle ne s'éjourne pas dans les tubes, en s'opposant à l'afflux de l'eau de renouvellement; 2^o que cette eau doit toujours arriver avec assez d'abondance pour que les tubes ne restent jamais vides, même en partie, quelle que soit la rapidité de la circulation et l'intensité de la vaporisation.

Si ces deux conditions ne sont pas simultanément remplies, le faisceau tubulaire est exposé à brûler, pour peu que le feu soit poussé avec une grande activité.

Production de vapeur sèche par kilogramme de charbon brûlé, ramené à l'état pur, et par mètre carré de surface de chauffe. — Il serait intéressant de pouvoir comparer entre eux, au point de vue de la bonne utilisation du combustible, les différents systèmes de chaudières multitubulaires. Un travail de ce genre ne saurait malheureusement donner aucun résultat précis. En effet, la production de vapeur par kilogramme de charbon consommé dépend d'éléments très

complexes, tels que la nature, l'état physique, le pouvoir calorifique du combustible, l'habileté du chauffeur, l'allure plus ou moins forcée du foyer, la température de l'eau d'alimentation, la pression, la quantité d'eau entraînée, etc. On peut dire, toutefois, que les types bien combinés de chaudières multitubulaires vaporisent plus d'eau, toutes choses égales d'ailleurs, que les chaudières de grande capacité. Je crois que, dans les meilleurs systèmes, on peut admettre comme moyenne, avec une bonne allure, une production de 8 à 9 kilogrammes de vapeur sèche par kilogramme de charbon ramené à l'état pur. Dans ces conditions, la température des gaz à leur entrée dans le carneau conduisant à la cheminée ne dépasse généralement pas 180 à 200°, alors que dans les chaudières ordinaires elle est habituellement de plus de 300°. Elle s'abaisse même à environ 100° lorsque les gaz servent, en dernier lieu, à réchauffer l'eau d'alimentation.

Quant à la production de vapeur par mètre carré de surface de chauffe, il est bon, pour que la marche reste économique et que l'appareil ne soit pas surmené, de ne pas la pousser au-delà de 12 à 15 kilogrammes par heure; toutefois, dans les générateurs Belleville, où la circulation est particulièrement rapide, on peut, sans inconvenient, atteindre 18 kilogrammes, et même davantage.

En résumé, les générateurs à petits éléments, supposés convenablement installés et habilement conduits, sont des appareils qui, indépendamment de la sécurité qu'ils procurent, permettent de réaliser une économie notable sur le prix du kilogramme de vapeur.

ÉCONOMIE DE POIDS

Légèreté des générateurs à petits éléments. — Ils sont beaucoup plus légers vides ou remplis d'eau, que les chaudières ordinaires, et même que les chaudières tubulaires de même puissance, surtout quand ils ne comportent pas un volumineux réservoir supérieur. Cette qualité est précieuse dans la marine, car elle permet de substituer un frêt productif à un poids mort, et procure ainsi, indirectement, un bénéfice supplémentaire.

ÉCONOMIE DE PLACE

Faible emplacement nécessaire pour une installation. — Grâce à leur faible volume, on peut installer les chaudières multitubulaires dans des locaux très exigus, et obtenir ainsi l'application de grandes forces avec un espace restreint. Les générateurs Belleville ont un volume cinq à six fois moindre que celui des chaudières à bouilleurs de même puissance. Sous ce rapport, les types les moins avantageux sont ceux qui exigent autour de chaque générateur des intervalles libres assez larges pour les nettoyages, ainsi que pour la sortie et la rentrée des tubes.

FACILITÉ DE MONTAGE

Division en pièces peu pesantes et de dimensions restreintes. — Les chaudières à petits éléments sont généralement formées, à l'exception de leurs réserves,

voirs supérieurs, de pièces peu pesantes, et souvent aussi facilement démontables. Il résulte de là une grande commodité pour les transports et pour le montage. On peut, en effet, les diviser en colis de faibles poids et de dimensions restreintes, et les faire circuler ainsi, aisément, dans les mauvais chemins et dans les pays accidentés. On peut de même les introduire par parties dans les emplacements d'un accès difficile, par exemple dans les sous-sols des maisons, au fond des mines ou dans les cales des navires. L'économie qui correspond à cet avantage est parfois loin d'être négligeable.

FACILITÉ DE CONDUITE

Influence du volume d'eau. — Lorsque les générateurs multitubulaires renferment un volume d'eau assez considérable, par suite de la réserve accumulée dans les réservoirs où se trouve le niveau normal, leur conduite ne diffère guère de celle d'une chaudière quelconque; leur stabilité manométrique est suffisamment assurée, et leur niveau d'eau ne varie pas brusquement. On peut donc les alimenter d'une manière intermittente, et les employer tels quels à un travail industriel irrégulier. Mais, s'il en est autrement, si les capacités renfermant de l'eau sont exclusivement tubulaires, il est bon d'avoir recours à des appareils automatiques pour accélérer ou ralentir l'afflux d'eau alimentaire, et déterminer l'activité de la combustion selon les nécessités du travail. J'ai déjà parlé du régulateur d'alimentation et de niveau d'eau, et du régulateur de tirage et de pression de la chaudière Belleville, employés pour cet objet; ces appareils ont reçu la sanction de l'expérience; ils règlent d'eux-mêmes le régime d'alimentation, la pression de la vapeur et la marche du foyer, et rendent ainsi la tâche du chauffeur moins délicate.

FACILITÉ DES NETTOYAGES

Épuration de l'eau d'alimentation et nettoyage intérieur des tubes. — La rapidité de circulation de l'eau dans les tubes retarde l'adhérence, puis l'épaississement des incrustations au contact des parois chauffées, mais ne peut arriver à supprimer les dépôts de ce genre. Il faut donc se préoccuper du nettoyage intérieur des chaudières à petits éléments, pour éviter les coups de feu et assurer une facile transmission de la chaleur à l'eau à vaporiser.

Une première mesure à recommander consiste à épurer les eaux par les procédés connus, avant de les envoyer à la chaudière.

Quand elles ne sont pas trop impures, on peut se dispenser de cette opération préalable, mais il est bon, alors, qu'elles se dépouillent, avant de pénétrer dans les tubes, de la majeure partie des sels incrustants qu'elles renferment.

Ce résultat est obtenu, dans la chaudière Belleville, par l'injection directe de l'eau froide à l'une des extrémités du réservoir renfermant la vapeur à haute pression ; en outre, dans les types les plus récents, cette eau est traversée sur le

trajet qu'elle doit faire pour se rendre à l'autre extrémité du réservoir, par les gerbes fluides qui s'échappent des orifices supérieurs des divers éléments ; elle est ainsi soumise à une agitation violente, sa température s'élève rapidement, et il en résulte la précipitation, à l'état pulvérulent, des sels calcaires qui s'y trouvaient en dissolution. Ces sels descendant avec elle dans le tuyau qui aboutit au distributeur horizontal d'alimentation, mais, en raison de leur densité, ils ne pénètrent pas dans ce distributeur, et tombent en vertu de leur poids dans un récipient spécial situé sur le prolongement du tuyau d'amenée et appelé déjecteur ; on les expulse de temps à autre, par la pression de la vapeur, en manœuvrant un robinet de purge.

On obtient encore ainsi un autre avantage : c'est que l'eau de renouvellement, introduite dans le distributeur d'alimentation, est presque aussi chaude que la vapeur qu'il s'agit de produire : dès lors, on n'observe plus entre les divers éléments les écarts de température et les différences de vaporisation qui se manifestaient parfois, lorsque l'alimentation se faisait directement à froid dans le distributeur, et qui occasionnaient des inégalités de niveau d'eau et de dilatation préjudiciables à la solidité de l'appareil.

Les bons effets de ce procédé, qui n'a d'autre inconvénient que de charger d'une plus grande quantité d'eau la vapeur du réservoir, ont été constatés par une longue pratique industrielle ; aussi a-t-il été adopté en principe, et sous réserve de modifications dans les détails, dans nombre de types de chaudières à tubes d'eau ; il rend les nettoyages intérieurs moins fréquents, mais ne suffit pas non plus, à beaucoup près, à les éviter complètement, et il convient, par suite, de prendre les dispositions nécessaires pour exécuter rapidement ces opérations, qui sont d'autant plus faciles que les tubes sont plus courts.

Quand on a recours aux désincrustants, il faut éviter l'emploi de ceux qui sont solides et volumineux, parce qu'en se répandant dans le faisceau tubulaire, ils pourraient y occasionner des obstructions.

Dans le cas des générateurs à tubes de retour de flammes, il faut nécessairement, pour les nettoyages, enlever ces tubes, ou les petits faisceaux intérieurs ; on y arrive assez aisément en les assemblant aux collecteurs ou aux boîtes qu'ils traversent par le système Béendorf.

Lorsque les tubes sont réunis de proche en proche par des boîtes et des communications indépendantes, comme dans les chaudières de Naeyer, Lagosse et Root, on ne peut les nettoyer qu'en dégageant leurs orifices par l'enlèvement des communications. La jonction de celles-ci avec les boîtes étant obtenue au moyen de petits tubes en fer coniques à leurs extrémités, on a quatre joints à défaire du même côté, par boîte correspondant à un seul ou à deux tubes : la manœuvre est donc assez longue et délicate ; de plus, ces joints ont l'inconvénient de ne pas être autoclavés ; ils sont maintenus par la pression exercée sur eux au moyen d'ancres et de boulons. Enfin, lorsque l'inclinaison des tubes est assez forte, les raccords sont exposés à s'obstruer du côté de l'alimentation.

Dans les chaudières Belleville, et dans celles où les tubes débouchent dans des collecteurs ou dans des caisses entretoisées, ils sont directement et aisément accessibles par des ouvertures pratiquées en face d'eux, et fermées à l'aide de tampons, autoclaves ou non autoclaves.

Bouchons autoclaves et non autoclaves. — Les bouchons non autoclaves, notamment ceux qui sont retenus sur leur siège par une ancre intérieure, au moyen d'un boulon, sont plus exposés aux fuites à chaud que les bouchons autoclaves ; ils ont, en outre, l'inconvénient de pouvoir être projetés avec force, en cas de rupture de l'attache. Dans les chaudières Collet, on a disposé, pour empêcher cette projection, des barrettes de sûreté en fonte, dont chacune agit sur deux bouchons voisins. On évite d'ailleurs les accidents de ce genre en donnant aux boulons de serrage des dimensions largement calculées, et en les fabriquant en fer ou en acier d'excellente qualité ; il faut bien se garder aussi de les serrer à chaud, et d'agir violemment sur eux à froid.

Les bouchons autoclaves sont préférables aux précédents, au point de vue de la sécurité ; de plus, leur étanchéité augmente avec la pression. Souvent, ce sont des tampons ordinaires à recouvrement intérieur, avec joint formé par une rondelle d'amianto ou de caoutchouc. Mais on leur substitue parfois, avec juste raison, des disques en forme de cône renversé, faisant joint métallique sur l'ouverture correspondante, sans interposition d'aucune matière ; on en trouve des applications dans les chaudières Roser, Maniguet, etc. Ces deux modes de fermeture peuvent encore être améliorés par la substitution d'une sorte de godet extérieur à l'ancre de serrage du boulon ; dès lors, si le joint vient à fuir, on peut, pendant la marche même, enlever l'écrou et le godet, mettre à celui-ci une rondelle de caoutchouc ou une couche de peinture au minium, le replacer sur son siège, le serrer au moyen de l'écrou et avenger ainsi la fuite.

La chaudière Hanrez possède des autoclaves qui participent des deux systèmes précédents. L'écrou du boulon de serrage du disque à recouvrement intérieur, au lieu d'appuyer sur une ancre ou sur un petit godet, agit sur un second disque extérieur, présentant une nervure circulaire à profil en forme de coin. Cette nervure s'engage entre la paroi de l'orifice et un prolongement en relief du disque interne, et assure par son enflement entre l'une et l'autre une étanchéité d'autant plus complète que le serrage du boulon est plus énergique. Cette étanchéité résulte à la fois du contact du disque intérieur sur son siège, et de l'introduction de la nervure circulaire entre le prolongement de ce disque et le bord de l'ouverture.

Nettoyage extérieur des tubes. — Il importe aussi que les tubes soient nettoyés de temps à autre à l'extérieur. Ce nettoyage se fait plus ou moins aisément, suivant que le faisceau tubulaire est accessible par l'une de ses extrémités ou seulement par les côtés.

Lorsqu'il est accessible par l'avant ou par l'arrière, on enlève les dépôts qui adhèrent à l'extérieur des tubes en passant simplement dans leurs intervalles une

brosse en crin ou en métal montée sur une tringle de longueur convenable, ou en faisant usage d'une lance à vapeur. On peut opérer de cette manière dans les chaudières Belleville, Lagosse, Terme et Déharbe, etc. Mais, lorsque les tubes débouchent dans des boîtes qui forment à leurs extrémités des parements continus, dans des collecteurs joints ou dans des caisses entretoisées, le nettoyage par l'avant ou l'arrière devient impossible, à moins que le faisceau ne soit disposé presque verticalement, comme dans la chaudière Hanrez; il faut alors, ou bien pratiquer dans le fourneau des baies latérales, ce qui interdit le montage des générateurs par batteries continues, tout en présentant peu de commodité pour le travail, parce que les dimensions des ouvertures ne permettent généralement pas d'atteindre facilement toutes les parties de la surface de chauffe, ou bien opérer le nettoyage en pénétrant dans le foyer, ce qui est une opération pénible, et ayant par suite chance d'être imparfaitement exécutée, sans compter que les cloisons des retours de flammes s'opposent souvent à un nettoyage complet. Or, les suies et les cendres qui s'attachent aux tubes sont très mauvaises conductrices de la chaleur et favorisent l'altération du métal; il importe donc de pouvoir s'en débarrasser facilement, même en pleine marche, et on devra préférer, à ce point de vue, les types qui donnent accès au faisceau par l'une au moins de ses extrémités.

ÉCONOMIE DANS L'ENTRETIEN ET FACILITÉ DES RÉPARATIONS

Coups de feu. — Les avaries les plus à craindre dans les générateurs à petits éléments, spécialement dans ceux où le niveau de l'eau se trouve à l'intérieur du faisceau tubulaire, sont les coups de feu occasionnés par une alimentation insuffisante, par des obstructions locales, par une accumulation de dépôts sur certaines parties des surfaces de chauffe ou par un chauffage trop énergique. On les évitera en apportant des soins particuliers à l'alimentation et à la conduite du feu, en surveillant le niveau d'eau et le fonctionnement des pompes ou des injecteurs, en s'assurant de temps à autre de l'état des conduites d'amenée de l'eau, et en procédant à des nettoyages fréquents et complets du faisceau tubulaire. Si les eaux dont on dispose sont quelque peu impures, il ne faudra pas hésiter à les épurer au préalable dans des appareils spéciaux, car la précipitation des sels calcaires dans la vapeur à haute pression produirait alors un effet insuffisant. Dans tous les cas, il ne faut jamais faire usage de désincrustants solides et volumineux, parce qu'il pourrait en résulter des obstructions.

Chevilles en métal fusible. — Pour éviter cette catégorie d'accidents, les chaudières Belleville sont pourvues de chevilles en métal fusible; leur fusion prévient de l'abaissement de l'eau ou de l'obstruction d'un élément avant qu'une avarie soit possible; l'attention du chauffeur est ainsi appelée en temps utile sur les points où elle est nécessaire.

Liberté des dilatations. — Il faut aussi s'attacher à ce que les parties exposées à l'action de la chaleur puissent, autant que possible, se dilater librement dans tous les sens, afin que les écarts de température, dans les diverses régions de l'appareil, n'occasionnent pas des dislocations, des fuites ou des ruptures.

Les dilatations contrariées sont une des principales causes de destruction des chaudières ordinaires, dont les différentes parties sont toujours inégalement chauffées. Les refroidissements qui se produisent, lors de l'ouverture des portes du foyer, par l'entrée subite d'un grand volume d'air froid y occasionnent souvent des contractions funestes à la conservation des assemblages et des tôles elles-mêmes, qui se criquent à la longue, au grand détriment de leur résistance.

Cet effet est également à redouter dans les chaudières multitubulaires, surtout dans celles où la circulation est peu active, et où les tubes sont longs et assemblés aux deux bouts à des pièces très rigides, telles que des caisses en tôle, ou même des collecteurs en fonte ou en fer. Les différences dans les dilatations peuvent alors entraîner la déformation des tubes ou leur dessertissage. La chaudière Belleville est peu sujette à ce genre d'avaries ; chacun de ses éléments, composé de deux séries de tubes assez courts, inclinés en sens inverses dans des plans verticaux très rapprochés, et réunis à l'avant et à l'arrière par des boîtes horizontales, le tout formant un serpentin continu, constitue une sorte de ressort très élastique qui se prête aussi bien que possible au libre jeu des allongements et des contractions, si fréquents en cours de service. Ces éléments reposent d'ailleurs, à l'arrière, sur des galets qui augmentent encore leur faculté d'extensibilité.

La liberté des dilatations est aussi convenablement assurée dans les chaudières où les tubes peuvent jouer en longueur à l'une de leurs extrémités, par exemple dans les chaudières Terme et Déharbe, Collet, Bourgois et Lencauchez.

Elle l'est moins bien dans celles où les tubes sont reliés aux deux bouts par des boîtes et des communications. Cependant, le système présente encore, dans ce cas, une certaine élasticité, que l'on a cherché à augmenter, dans la chaudière Root, en profilant en forme de bourrelet les petits tubes en fer biconiques intercalés entre les boîtes et les communications.

Enfin, on ne peut combattre l'inconvénient des dilatations contrariées, lorsque les tubes débouchent aux deux extrémités dans des collecteurs ou des caisses rigides, qu'en suspendant l'appareil entier à des poutres ou à des châssis indépendants de la maçonnerie, ou encore en le faisant reposer d'un côté sur des galets ; mais, si l'on peut de cette manière lui permettre de se dilater ou de se contracter dans son ensemble, on est impuissant à empêcher les altérations locales, et notamment celles qui sont la conséquence de l'inégale dilatation des tubes.

Proscription de l'emploi de la fonte ordinaire. — Il est prudent de proscrire la fonte ordinaire de toutes les parties qui sont soumises à des températures élevées et brusquement variables. Son emploi est officiellement interdit

dans plusieurs pays. En France, il tend à disparaître, même dans les collecteurs servant à réunir les tubes d'un même élément. C'est ainsi que, dans les types récents des chaudières Babcock, Roser, Montupet, etc., ces collecteurs sont en fer fondu ou forgé. Le nombre des ruptures, résultant de l'inégalité des dilatations et des variations de température, est ainsi fortement diminué.

Épaisseur des tubes. — Quant à l'épaisseur des tubes, il faut qu'elle soit assez forte pour offrir une sécurité complète et laisser une certaine marge aux corrossions et à l'usure. L'épaisseur de 5 millimètres, pour un diamètre de 0^m,10, doit être regardée comme satisfaisante. Elle se prête encore à une facile transmission de la chaleur au travers du métal.

Vidange complète des chaudières avant leur mise en chômage. — Une précaution indispensable dans la pratique consiste à vider complètement les chaudières lorsqu'on les met en chômage, afin d'éviter les corrossions locales que le séjour prolongé de l'eau y produirait. Pour que la totalité du liquide puisse s'en écouter, il faut nécessairement que les tubes possèdent une certaine inclinaison et ne soient pas complètement horizontaux.

Avantage des tubes et éléments interchangeables. -- Les réparations sont rendues relativement faciles et rapides, dans les générateurs multitubulaires, par le fait que les tubes et les éléments y sont interchangeables. Dans certains cas, on peut ajourner une réparation devenue nécessaire en supprimant temporairement le tube ou l'élément qui laisse à désirer, et en fermant les ouvertures ainsi produites par des obturateurs ou des joints pleins.

Variétés diverses de joints. — La nature des joints influe aussi sur la facilité des réparations. Il est bon qu'ils puissent se démonter rapidement, mais il ne faut pas trop sacrifier à cet avantage, car il est indispensable, avant tout, qu'ils soient assez solides pour résister, sans fuites, à la pression intérieure et aux poussées résultant de l'inégalité des dilatations.

Dans la chaudière Belleville, on s'est préoccupé surtout de la solidité des assemblages : les tubes et les boîtes y sont raccordés par des joints à vis assujettis par des manchons et des contre-bagues ; le démontage des tubes ne peut alors s'opérer qu'en coupant au burin les manchons et les bagues qui les relient au reste de l'élément ; on a, toutefois, adopté le joint à emboîtement conique pour le rattachement des serpentins aux collecteurs de vapeur et aux distributeurs d'eau d'alimentation. Ce dernier joint est très usité dans les chaudières où les tubes sont reliés par des boîtes et des communications, à l'effet d'assembler les unes aux autres. Il existe notamment dans les chaudières de Naeyer, Lagosse et Root. On le retrouve encore dans la chaudière Collet ; là, il sert à réunir les tubes bouilleurs aux collecteurs d'avant et aux boîtes d'arrière ; le serrage est obtenu au moyen d'un long boulon allant d'une extrémité à l'autre de chaque tube, et servant en même temps

à maintenir les bouchons de nettoyage situés à ses deux extrémités ; la grande longueur de ces boulons, et leur différence de dilatation par rapport aux tubes bouilleurs qui les entourent, tendent à augmenter leur serrage à chaud, ce qui peut produire un léger enfouissement des portées coniques des extrémités des tubes dans les collecteurs et dans les boîtes d'arrière, et par suite occasionner des fuites lorsque le générateur se refroidit. Dans la chaudière Bouron, le long boulon est remplacé par le tube directeur lui-même, qui présente alors des trous à ses deux extrémités pour la circulation de l'eau ; cette disposition a donné lieu à plusieurs accidents dûs à la solidité insuffisante du tirant. Il convient enfin de citer le joint à emboîtement conique Terme et Deharbe, serré au moyen d'un boulon à ancre dont les branches s'accrochent au tube correspondant, qui présente à cet effet deux trous opposés, et dont l'écrou agit sur le bouchon non autoclave du collecteur ou de la boîte auxquels ce tube aboutit.

Le joint Bérendorf est très usité, comme je l'ai déjà dit, pour le montage des tubes de retour de flammes. Il est prudent, lorsque ces tubes sont mis en place, de consolider leurs joints coniques, ce qu'on peut faire au moyen d'un boulon dont l'écrou vient presser directement ou par l'intermédiaire d'une ancre sur une surface fixe. Cette disposition se remarque dans la chaudière Roser et dans la chaudière Maniguet. Dans la chaudière Bourgois, type présenté à l'Exposition, l'emboîtement conique des tubes existe sur le barillet d'avant et sur les boîtes d'arrière ; celles-ci sont en même temps fixées aux tubes à l'aide de boulons.

Le plus généralement, lorsque les tubes débouchent dans des collecteurs ou dans des caisses, ils sont solidement sertis au moyen de l'outil Dudgeon ou de tout autre apte à produire un mandrinage énergique ; parfois, on en rabat les extrémités au bec-d'âne pour produire un bourrelet qui améliore encore le joint. Dans la chaudière Charles et Babillot, les tubes sont, par exception, rivés aux boîtes à la façon ordinaire.

PRODUCTION DE VAPEUR SÈCHE

Dispositifs servant à obtenir de la vapeur sèche. — La vapeur engendrée dans les chaudières à circulation rapide renferme une notable quantité d'eau entraînée ; cet inconvénient est d'autant plus accentué que la rapidité de la circulation est plus grande ; on a donc dû imaginer des dispositifs spéciaux pour le faire disparaître.

On y est parvenu, dans la chaudière Belleville, à l'aide d'un épurateur de vapeur à action centrifuge. Dans le type 1877, le courant de vapeur et d'eau vient frapper une cloison directrice courbe qui détermine, avec la paroi du réservoir de vapeur, un conduit circulaire dans lequel passe le produit de la vaporisation ; la vitesse du courant et la forme circulaire du conduit qu'il est obligé de parcourir donnent lieu à une action centrifuge qui sépare la vapeur des vésicules d'eau et

des autres corps étrangers qu'elle entraîne ; cette eau et ces corps denses se rendent à la partie inférieure du réservoir, où ils se mélangent avec le courant continu d'eau d'alimentation. Ce mode d'essorage convient bien à l'état de grande division dans lequel se trouve l'eau entraînée. La prise de vapeur se fait ensuite au moyen d'un tube diviseur, après quoi la vapeur passe dans le serpentin sécheur situé sous le plafond supérieur du fourneau.

Dans le type 1889, on a remplacé le circuit unique précédemment affecté à l'épuration par des circuits multiples dans lesquels la vapeur se dépoile successivement de l'eau entraînée par action centrifuge ; elle subit en même temps, en passant de l'un à l'autre, des changements brusques de direction qui favorisent cette séparation. L'effet ainsi produit est très complet, si complet qu'on n'a pas craint de faire passer les jets fluides sortant des éléments au travers du courant d'eau alimentaire, pour y produire une agitation favorable à la précipitation des dépôts calcaires, de sorte qu'en réalité, on fait précédé d'une forte addition d'eau l'opération du séchage de la vapeur, ce qui peut paraître étrange en principe, et n'est acceptable qu'en raison de la perfection de l'épurateur.

Dans la plupart des autres systèmes de chaudières, les réservoirs d'eau supérieurs offrent une grande surface libre de liquide au dégagement des bulles de vapeur, mais cette surface est peu distante du robinet de prise ; de plus, l'ébullition tumultueuse favorise les entraînements d'eau. Pour éviter ce dernier effet, on fait parfois déboucher au-dessus du plan d'eau les collecteurs verticaux ou inclinés qui amènent la vapeur ; chacun d'eux lance alors sa gerbe dans un égouttoir ou contre la paroi d'un coffre dans lequel s'opère la séparation mécanique de l'eau et de la vapeur ; ces dispositions ont été adoptées dans les chaudières Bourgois et Montupet. Dans tous les cas, on place la sortie de la vapeur aussi loin que possible de son arrivée, quelquefois dans un dôme, et on l'assèche en la faisant circuler entre des chicanes, ou en la faisant passer, à la sortie, dans un tube diviseur.

Dans la chaudière Maniguet, la vapeur, prise à la partie supérieure d'un dôme, traverse un détendeur, puis revient dans le réservoir par un gros tube incliné de l'arrière vers l'avant, et à l'extrémité arrière duquel se trouve la tubulure où est monté le robinet de prise ; de cette façon, le mélange d'eau et de vapeur pris au dôme est d'abord laminé par la soupape du détendeur, puis chauffé à l'intérieur du gros tube, dont la température est inférieure à celle du réservoir d'une quantité qui dépend de la différence de pression des deux milieux ; cette double action produit, à ce qu'il paraît, de la vapeur bien sèche.

Les sécheurs de vapeur que l'on adjoint souvent aux générateurs multitubulaires ne sont jamais soumis à une très haute température ; ils ne doivent donc pas être considérés comme des surchauffeurs. Il est bon qu'il en soit ainsi, car les avantages théoriques du surchauffage sont largement compensés, dans la pratique, par l'augmentation des refroidissements et des frottements, et par les chances de grippement des surfaces frottantes et de destruction des garnitures ;

il est donc préférable de se borner à sécher la vapeur, pour éviter les entraînements d'eau aux cylindres des machines, ou tout au moins à la surchauffer modérément. Ajoutons enfin qu'une température exagérée exposerait les sécheurs à une usure trop rapide.

RÉGULARITÉ DE MARCHE

Difficulté particulière aux chaudières à petits éléments. Organes automatiques d'alimentation et de tirage. — La difficulté d'obtenir une marche parfaitement régulière, surtout lorsque la dépense de vapeur est variable, constitue le principal point faible des chaudières à petits éléments. Il faut en surveiller de très près l'alimentation et la conduite du feu pour obtenir une pression et un niveau d'eau constants. On peut y remédier, dans une certaine mesure, en augmentant les dimensions des réservoirs d'eau et de vapeur, et en se procurant ainsi un volant de chaleur qui diminue les écarts de pression et restreint les variations du niveau d'eau ; mais cette solution est en contradiction avec le principe de sécurité qui est l'une des principales raisons d'être des chaudières à petits éléments. Mieux vaut encore, à mon avis, accepter franchement les inconvénients de la faible réserve d'eau, et chercher à les combattre par l'emploi d'organes automatiques analogues à ceux qui rendent tant de services dans la chaudière Belleville. On est déjà entré dans cette voie : c'est ainsi que dans le type Bourgois et Lencauzé, un flotteur commande un piston régulateur qui envoie la vapeur motrice à la pompe servant à l'alimentation du générateur.

Détendeurs de vapeur. — Lorsque le travail industriel à accomplir exige une pression déterminée, il est bon d'avoir recours à un détendeur qui fixe cette pression d'une manière invariable, tout en maintenant dans le générateur une pression élevée, favorable à la précipitation des dépôts calcaires.

RAPIDITÉ DE MISE EN PRESSION

Temps nécessaire pour la mise en pression. — La rapidité de mise en pression résulte du volume très réduit de l'appareil, et surtout de la faible quantité d'eau qu'il renferme. Dans les générateurs Belleville, où cette quantité est réduite au minimum, il suffit de 15 à 20 minutes pour atteindre la pression de marche ; c'est un avantage qui, dans maintes circonstances, présente une importance considérable.

ÉCONOMIE DANS LE PRIX DE PREMIER ÉTABLISSEMENT

Comparaison avec les autres types de chaudières. — Les générateurs à petits éléments coûtent généralement à moitié le chiffre total comparé aux chaudières tubulaires, et un peu plus que les chaudières ordinaires à bouilleurs

et à réchauffeurs ; mais si l'on tient compte de l'économie qu'ils permettent de réaliser sur la place, la maçonnerie des fourneaux, la construction des bâtiments, les transports et les manutentions, on peut dire qu'ils offrent le plus souvent la solution la moins onéreuse, surtout si l'on remarque qu'ils permettent l'emploi des hautes pressions, qui entraînerait dans les chaudières ordinaires des augmentations de poids considérables.

Durée. — Quant à la durée, il est difficile d'établir des comparaisons, à cause du peu d'ancienneté de la plupart des types de chaudières multitubulaires. Cependant, je connais des batteries de chaudières Belleville qui fonctionnent depuis une vingtaine d'années ; c'est d'un bon indice, et j'ajoute que la facilité relative avec laquelle leurs pièces peuvent être remplacées leur assure une existence presque indéfinie, par suite du renouvellement successif de leurs diverses parties.

Résumé. — Finalement, les générateurs à tubes d'eau, quand ils sont bien conçus et bien construits, peuvent présenter une supériorité incontestable au point de vue de la sécurité, de l'économie de combustible, de l'économie de poids et de place, de la facilité de montage et de la rapidité de mise en pression. Ils se prêtent parfaitement à l'emploi des hautes pressions et peuvent être disposés de manière à produire de la vapeur bien sèche. Leur prix de premier établissement n'est pas excessif, et ils sont en général assez faciles à entretenir et à réparer. Toutefois, les nombreux types qui se disputent la faveur du public présentent des dispositions variées, les unes satisfaisantes, les autres critiquables ; il appartient à l'acheteur d'en peser les avantages et les inconvénients pour fixer sa préférence. Mais il ne doit jamais perdre de vue que les chaudières à tubes d'eau doivent être ménagées, et comportent des soins particuliers en ce qui concerne l'alimentation et la conduite du feu, sous peine de voir des accidents se produire ; il doit aussi porter son attention sur la qualité de l'eau alimentaire, ne pas hésiter à l'épurer dans des appareils spéciaux si elle est quelque peu chargée de sels et de matières étrangères, et veiller à ce que le faisceau tubulaire soit fréquemment et soigneusement nettoyé. A ces conditions, les chaudières à petits éléments, si elles sont d'un bon système — et il en existe — et si leur construction a été soignée, ne donneront pas lieu à des mécomptes.

Emploi dans la marine. — Dans la marine, spécialement dans la marine militaire, les qualités de ces appareils sont particulièrement précieuses. Les anciennes chaudières, vu leurs grandes dimensions et les efforts énormes qu'elles ont à supporter, ne peuvent être que très difficilement armées de manière à résister à la haute pression qu'exigent les machines compound, dont l'usage se répand de plus en plus, en raison de l'économie de vapeur et des autres avantages qu'elles procurent ; de plus, l'explosion d'une de ces chaudières entraînerait pres-

que infailliblement la perte du bâtiment. Les chaudières à petits éléments donnent, au contraire, une grande sécurité ; dans le cas même où elles viendraient à être traversées par un projectile ennemi, il n'en résulterait qu'un écoulement de fluides sans grande importance et sans effets dynamiques. Elles permettent, en outre, de réduire la consommation de charbon par kilogramme de vapeur, et par suite de ménager les approvisionnements. Leur prompte mise en pression donne toute facilité pour les départs rapides et les changements d'allure du navire ; leur légèreté est très avantageuse, en ce qu'elle vient atténuer les inconvénients du poids considérable de l'artillerie et des blindages ; enfin, leur faible volume économise la place et permet soit d'améliorer les aménagements, soit d'augmenter les approvisionnements du bâtiment en combustible, en munitions ou en vivres.

Statistique des accidents survenus dans l'emploi des générateurs à petits éléments. — Pour résumer les résultats obtenus dans l'emploi des générateurs à petits éléments, en ce qui concerne la sécurité, j'ai relevé sur les statistiques officielles, à partir de l'année 1870, les accidents auxquels ils ont donné lieu, et qui ont été l'objet de rapports administratifs.

De 1870 à 1875 (6 ans), il ne s'en est pas produit un seul.

De 1876 à 1888 (13 ans), leur nombre a été de 14, dont 2 en 1886, 5 en 1887 et 1 en 1888 ; ils ont occasionné la mort de 8 ouvriers et des blessures à 14 autres, soit en tout 22 victimes.

Relativement à leurs causes, ils se répartissent de la manière suivante :

NATURE DES CAUSES	Nombre d'accidents	Nombre de victimes	
		Tués	Blessés
Coups de feu	par défaut d'alimentation	2	2
	par obstruction provenant de dépôts incrustants.	3	»
	par chauffage trop énergique	2	1
Vices de construction	2	1	2
Épaisseur insuffisante de tubes sécheurs par suite de corrosion, d'usure, etc	3	3	3
Rupture d'attachments de bouchons non autoclaves .	2	1	6
Ensemble	14	8	14

Je n'ai pas compris dans ce tableau 7 explosions (1 mort et 14 blessés) de chaudières Field, que je ne considère pas comme se rattachant au groupe des générateurs à petits éléments. Les conclusions qu'on peut en tirer cadrent parfaitement avec l'exposé que je viens de faire. Elles montrent une fois de plus

qu'il est urgent de veiller à l'épuration des eaux d'alimentation, à la marche des pompes ou des injecteurs qui servent à les introduire dans les chaudières, et à la conduite du feu. Elles justifient la préférence à donner aux bouchons autoclaves, et montrent que l'épaisseur des tubes doit être déterminée en prévision des conséquences de l'usure et des corrosions.

Je dois faire remarquer, en outre, que quatre des accidents dont il s'agit n'auraient eu que des suites insignifiantes et n'auraient pas atteint le personnel si les portes des boîtes à tubes et des foyers avaient été solidement loquetées et fermées pendant le travail. Cette simple précaution aurait diminué de 4 le nombre des morts et de 3 celui des blessés ; aussi, la circulaire ministérielle du 14 août 1888, relative aux conditions à imposer en cas de tolérance d'emplacement pour les chaudières multitubulaires, a-t-elle spécifié une prescription libellée comme il suit : « Les portes des boîtes à tubes seront tenues fermées pendant le travail ; celles du foyer le seront habituellement ; le système de fermeture présentera des garanties de solidité. » On ne saurait trop recommander aux industriels de se conformer à cette règle, dont l'inobservation a eu des conséquences si funestes. »

Dans tous les cas, aucun accident de chaudière à petits éléments n'a produit d'effets dynamiques appréciables ; sous ce rapport, le but poursuivi a été atteint de la manière la plus complète.

Le nombre des accidents croît naturellement avec celui des appareils en activité ; c'est une des raisons qui expliquent l'augmentation afférente à 1887. La statistique de 1888 dénote, il est vrai, une situation meilleure, mais les renseignements que je possède sur l'année 1889 me permettent de dire que les résultats n'en seront pas plus favorables que ceux de 1887. Dès lors, il faudrait compter annuellement, en moyenne, sur environ 3 ou 4 accidents de générateurs multitubulaires, ce qui représente à peu près $\frac{1}{10}$ du total des explosions connues de chaudières et de récipients de vapeur. Or, il existait en France et en Algérie, à la fin de 1887, en dehors de la marine militaire, 81506 chaudières et 23972 récipients en activité : en tout 105478 appareils. Pour que la proportion des accidents ne fût pas plus forte pour les chaudières à petits éléments que pour les autres appareils, il faudrait que leur nombre fût de 10548 ; comme il est très inférieur à ce chiffre, et qu'il n'en atteint même pas le tiers, on est amené à conclure que ces chaudières sont plus sujettes que d'autres aux accidents. En d'autres termes, leur moindre importance individuelle serait compensée, dans une certaine mesure, par leur fréquence plus grande. Peut-être serait-il excessif d'énoncer cette règle d'une manière absolument affirmative, et il faudrait surtout se garder de contester à ces appareils, pour ce motif, le caractère de générateurs de sécurité, puisqu'ils n'ont jamais donné lieu qu'à des fuites d'eau et de vapeur, sans projections ni danger pour les alentours ; mais il faut, du moins, tirer de cet exposé la conclusion que ces types de chaudières

comportent une surveillance très attentive de leur état d'entretien, et des soins particuliers pour leur conduite journalière.

Chaudière Serpollet. — Avant de terminer, je tiens à dire quelques mots d'un nouveau générateur, dont le volume est aussi réduit que possible, et dans lequel l'eau se vaporise instantanément, au fur et à mesure de son introduction : je veux parler de la chaudière Serpollet.

De nombreuses tentatives ont été faites autrefois pour créer des générateurs industriels à vaporisation instantanée ; c'est dans cette voie que M. Belleville a commencé ses premiers essais en 1850. La principale difficulté contre laquelle on avait à lutter résidait dans la haute température à laquelle les tubes devaient être portés à l'état sec ; cette température s'élevait fréquemment au rouge ; de plus, pendant les arrêts de la machine, les tubes étant vides d'eau et ne dépensant plus de chaleur, atteignaient en quelques minutes le rouge blanc, ce qui amenait leur destruction rapide ainsi que la dislocation des joints.

Ces défauts n'existent plus dans la chaudière Serpollet. Son principe consiste à faire passer l'eau à vaporiser à l'intérieur de tubes d'acier, de fer ou de cuivre, à parois épaisses, qui ont été aplatis par laminage de manière à transformer leur section intérieure en une simple fente de largeur à peine appréciable, $\frac{1}{10}$ à $\frac{3}{10}$ de millimètre environ.

Ces tubes, enroulés en forme de colimaçon, sont placés au-dessus d'un foyer et chauffés vers 300° ; on y injecte de l'eau au moyen d'une pompe à l'une des extrémités de la spire ; elle ressort aussitôt à l'autre extrémité sous forme de vapeur surchauffée. On obtient donc ainsi un appareil qu'on pourrait presque appeler une chaudière sans eau. Aucune fermeture n'est interposée entre la chaudière et la machine qui utilise sa vapeur ; d'autre part, l'injection de l'eau est obtenue au moyen d'une pompe mue par la machine elle-même, et dont le débit règle la production de vapeur et l'allure de cette machine. Pour stopper, on arrête l'injection d'eau ; le mouvement cesse aussitôt faute de vapeur ; le générateur est à la fois sans pression et vide d'eau. Si l'on veut remettre en marche, il faut donner quelques coups de pompe sans que la machine tourne ; il se produit alors un peu de vapeur qui amorce son mouvement, après quoi l'alimentation et la marche se poursuivent par le jeu automatique de la pompe.

Les tubes peuvent être portés au rouge sans danger. À cette température anormale, la vapeur n'y éprouve que très peu le phénomène de la dissociation ; il n'y a presque pas d'usure interne par oxydation, même dans le cas des tubes d'acier ou de fer, et les sels calcaires, quand l'eau en renferme, sont réduits en une poudre impalpable qui paraît jouer le rôle d'un corps lubrifiant.

Avec ce générateur, il n'y a plus d'accidents à craindre, car les seules capacités intérieures appréciables sont les parties du tuyau d'arrivée de l'eau et du tuyau de vapeur comprises entre le serpentin et les parois du fourneau, lesquelles,

pour une machine d'un cheval, ne renferment que quelques centilitres. Il n'y aurait même pas de danger pour la sécurité si, la machine étant à l'arrêt au point mort, on forçait l'injection d'eau à la main, le serpentin étant porté au rouge.

Cet ingénieux appareil n'est encore que dans la période d'essais et n'a été appliqué que pour de faibles puissances ; pour activer de fortes machines, il faudrait employer à la fois plusieurs serpentins. Quant à la consommation de combustible, elle est relativement considérable et s'élève, d'après l'inventeur, à 4 kilogrammes environ par cheval et par heure ; mais, indépendamment de l'avantage de son faible volume, la chaudière Serpollet donne le dernier mot en matière de sécurité, et mérite, sous ce rapport, d'être signalée à l'attention du public et des industriels.

APERÇU D'UNE ÉTUDE
SUR LE
Rendement des Chaudières à Vapeur
PAR
A. HUET
INGÉNIEUR CIVIL

Je présente dans ce qui suit un aperçu de deux études sur le rendement des chaudières à vapeur qui ont été lues à l'Institut royal des Ingénieurs des Pays-Bas, dans les séances du 14 Juin 1888 et du 9 Avril 1889.

Un exemplaire de chacune des deux études a été présenté au Congrès de mécanique ; elles seront désignées dans cet aperçu par les numéros I et II.

Nous désignons par :

a, le nombre de kilogrammes de combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille.

b, le rapport de la surface de chauffe à la surface de grille.

c, le nombre de kilogrammes de vapeur produit par heure et par mètre carré de surface de chauffe.

d, le nombre de kilogrammes de vapeur obtenu par kilogramme de combustible, ou bien le rendement du combustible.

On peut évidemment écrire cette proportion continue :

$$\begin{array}{l} a : 1 \\ 1 : b \\ 1 : c \\ d : 1 \end{array}$$

en multipliant on aura :

$$a \cdot d = b \cdot c$$

ou bien

$$d = \frac{b \cdot c}{a},$$

relation qui exprime le rendement du combustible en fonction des trois valeurs principales qui entrent dans un projet d'une chaudière à vapeur.

On voit bien que le problème est tout à fait indéterminé et qu'on peut ima-

giner un nombre illimité de chaudières qui, avec un rendement égal d , présentent des proportions de b , c , et a tout à fait différentes.

Pour faire bien ressortir le caractère indéterminé de ce problème, nous avons rassemblé une statistique qui s'étend sur une très grande variété de chaudières, depuis la chaudière en tombeau en Watt, du siècle passé, jusqu'à la chaudière de torpilleur de date récente.

Les écarts des différentes valeurs de a , b , c , d sont très grands ; nous les indiquerons ici par les limites extrêmes qui se sont rencontrées.

Combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille :

a min. == 27,28 kilogrammes, chaudière à 3 bouilleurs de Marazeau.
 a max. == 468,60 » chaudière de torpilleur de Thornycroft.

Rapport de la surface de chauffe à la surface de grille :

b min. == 11,52 kilogrammes, locomobile de Tuxford.
 b max. == 78,92 » chaudière verticale de Zambeaux.

Vapeur produite par mètre carré de surface de chauffe et par heure :

c min. == 7,15 kilogrammes, chaudière à réchauffeur de Prouvost.
 c max. == 85,60 » chaudière de torpilleur de Thornycroft.

Kilogrammes de vapeur par kilogramme de combustible :

d min. == 5,07 kilogrammes, chaudière à 3 bouilleurs de Piaget.
 d max. == 10,06 » chaudière de Schulz, Knaudt.

Kilogrammes de vapeur produit par heure et par mètre carré de grille :

$ad = bc$ min. == 195,052, chaudière à 3 bouilleurs de Marazeau.
 $ad = bc$ max. == 2797,542, chaudière de torpilleur de Thornycroft.

On voit clairement combien sont éloignées les limites extrêmes entre lesquelles oscille la solution du problème ; et ce qui est le plus remarquable, c'est qu'un rendement assez élevé a été réalisé avec des types de chaudières entièrement différents.

Un coup d'œil sur la liste des données expérimentales rassemblées dans les études présentées avec cet aperçu fait voir qu'un rendement de 8 kilogrammes de vapeur par kilogramme de charbon a été réalisé et surpassé dans toutes sortes de chaudières, dans lesquelles les valeurs respectives de a , b , c et d étaient entièrement différentes. Pour faciliter la revue de tous les résultats, ils ont été présentés dans un tableau graphique (voir l'étude I) dans lequel les abscisses donnent le nombre a de kilogrammes de combustible brûlé par heure et par mètre carré de grille et où figurent comme ordonnées les valeurs de b , c et d .

Cette méthode a le grand avantage de faire ressortir d'une manière sûre et facile s'il y a une loi générale qui domine le problème. Mais il faut avouer que même la représentation graphique n'augmente pas la probabilité de l'existence d'une telle loi générale.

Il se pourrait cependant qu'en étudiant un type spécial exécuté dans des proportions différentes une règle plus ou moins générale se fit jour pour déterminer les conditions nécessaires pour obtenir toujours la valeur maximum de d .

Dans le but d'éclairer cette partie de la question on a rassemblé dans un tableau graphique séparé (voir la planche de l'étude II) les résultats expérimentaux de deux types ; les chaudières à bouilleurs et les locomobiles.

Dans ce tableau, les abscisses représentent la valeur $\frac{c}{b}$ c'est-à-dire le nombre de kilogrammes de combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de chauffe. Les ordonnées figurent le nombre c de kilogrammes de vapeur vaporisés par mètre carré de surface de chauffe.

Les résultats pour chaque type s'écartent encore d'une manière si notable qu'il n'est pas facile de tracer une droite qui représente la moyenne de tous les résultats pour chaque type.

L'angle de cette droite avec l'axe des abscisses aura pour tangente la valeur $\frac{c}{a} - \frac{c}{b} = d$, c'est-à-dire le rendement du combustible.

Si on trace cette droite pour les deux types : les chaudières à bouilleurs et les chaudières de locomobiles on trouve le rendement moyen de :

7,68 pour les locomobiles ;

6,2 pour les chaudières à bouilleurs.

Cette méthode semble propre à ouvrir la voie pour trouver des résultats tant soit peu définitifs sur la valeur économique des différents types de chaudières. Seulement il faut que les données soient beaucoup plus multipliées et qu'elles soient rassemblées pour tous les principaux types de chaudières.

Ces données sont dispersées jusqu'ici dans un grand nombre de livres ; l'auteur de cet aperçu en a recueilli un certain nombre et il sera heureux de recevoir de ses lecteurs bienveillants les données qu'ils auront sous la main avec l'indication exacte de la source dont elles proviennent.

En rassemblant ces données il ne faut pas s'étonner d'en trouver parfois qui semblent inexacts, parce qu'elles ne satisfont pas à la condition $ad = bc$. Parmi les données que l'auteur a rassemblées, la plupart s'écartaient plus ou moins de cette condition, et j'en ai trouvé quelques-uns dont les écarts étaient si notables qu'il fallait les désigner spécialement.

Cependant la nécessité de cette condition $ad = bc$ est évidente en elle-même. Elle forme pour ainsi dire la pierre de touche des expériences que l'on fait, parce qu'elle permet de contrôler l'exactitude avec laquelle les observations ont été faites.

CONCLUSIONS

I. — Il est possible d'exprimer le rendement du combustible dans chaque chaudière à vapeur par la relation :

$$d = \frac{b}{a} c,$$

dans laquelle signifient :

a, kilogrammes de combustible brûlé par heure et par mètre carré de grille;

b, rapport de la surface de chauffe à la surface de grille;

c, kilogrammes de vapeur produits par heure et par mètre carré de surface de chauffe;

d, kilogrammes de vapeur obtenu par kilogramme de combustible.

II. — Pour les différents types de chaudières les valeurs numériques de *a*, *b*, *c* et *d*, qu'il faut choisir de préférence pour établir un projet, sont contenues entre des limites maximum et minimum que l'on trouve par la statistique des chaudières employées jusqu'ici.

III. — Pour chaque chaudière les données expérimentales doivent être contrôlées par la relation : $ad = bc$.

IV. — Il est désirable de rassembler un grand nombre de données expérimentales pour chaque type de chaudière en particulier, afin d'en déduire avec une grande probabilité la valeur de *d* qui peut être obtenue dans la pratique.

V. — La représentation graphique des données statistiques doit être faite de manière que les abscisses représentent la valeur $\frac{a}{b}$ et les ordonnées la valeur *c*. La courbe ou la droite qui peut être tracée comme moyenne de tous les résultats donne par son inclinaison la valeur de *d*.

VI. — Les comparaisons de ces inclinaisons qui représentent le rendement moyen des différents types fournira la solution du problème : lequel de ces types doit être considéré comme le plus propre à être adopté généralement pour autant que d'autres considérations le permettent.



NOTICE HISTORIQUE

SUR

l'Epreuve des Chaudières à Vapeur

PAR

A. HUET

INGÉNIEUR CIVIL

Richard Trevithick, ingénieur anglais d'un grand mérite, a inauguré l'emploi de la vapeur à haute pression, dont les dangers étaient estimés tels par James Watt, que celui-ci déclarait que Trevithick devait être pendu, ce qui heureusement n'a pas eu lieu.

Au contraire, on a voué récemment à sa mémoire une fenêtre commémorative dans l'abbaye de Westminster, où reposent aussi les cendres de James Watt, aux pieds de sa belle statue.

La mort a encore concilié ici des divergences d'opinion très accentuées. Maintenant la machine à haute pression de Trevithick travaille dans un accord fraternel avec la machine à basse pression de James Watt, dans la machine compound (synthèse remarquable de la thèse et de l'antithèse posées par Watt et Trevithick), que l'on doit aux efforts successifs de Jonathan Hornblower et Arthur Woolf.

La crainte des hautes pressions n'existe pas seulement en Angleterre. En France, l'année 1823 vit paraître un « Rapport à l'Institut de France (Académie des sciences), sur les avantages, sur les inconvénients, et sur les dangers comparés des machines à vapeur, dans les systèmes de simple, de moyenne et de haute pression, par une commission composée de Laplace, président ; de Prony, Girard, Ampère et Charles Dupin, rapporteur (Paris, Bachelier, 1823). »

A la page 42 de ce rapport on lit :

« 2^e Nous proposons qu'on éprouve par le moyen de la presse hydraulique, la force de toutes les chaudières ; en faisant supporter à ces chaudières une pression de quatre à cinq fois plus grande que celles qu'elles devront supporter dans le jeu habituel de la machine, tant que la pression sera comprise entre deux et quatre atmosphères. Au-delà de ce terme la pression d'épreuve devra surpasser

autant de fois la tension habituelle qu'éprouve la vapeur, lors du jeu de la machine, que cette tension surpassé de fois la simple pression de l'atmosphère. »

Dans ce rapport, la pression dont il est question était la pression absolue. En désignant la pression « habituelle » en atmosphères par x_1 , et la pression absolue « d'épreuve » par y_1 , les règles données sont exprimées par :

$$y_1 = 5x_1 \quad \text{et} \quad y_1 = x_1^2$$

En désignant par y et x les pressions « effectives » ou bien celles en dessus de l'atmosphère, on a :

$$\begin{aligned} y + 1 &= 5(x + 1) & y + 1 &= (x + 1)^2 \\ y = 5x + 4 & & y = x^2 + 2x & \end{aligned}$$

Les deux règles sont représentées dans le diagramme qui accompagne cette étude, page 81.

Dans la pratique elles auraient donné les résultats qui suivent :

Pression habituelle effective	differences	Pression d'épreuve effective	differences
$y = 5x + 4$	$x = 1$	$y = 9$	5
	» 2	» 14	5
	» 3	» 19	5
	» 4	» 24	11
	» 5	» 35	13
	» 6	» 48	15
	» 7	» 63	17
	» 8	» 80	19
	» 9	» 99	21
	» 10	» 120	23
$y = x^2 + 2x$	» 11	» 143	25
	» 12	» 168	

Ces exigences étaient énormes et, ce qui plus est, elles avaient un caractère progressif, comme on le voit par les différences.

La véritable signification de ces règles était la prohibition des hautes pressions et elles contenaient une démonstration claire de la crainte des graves dangers qu'on attendait de l'emploi des hautes pressions.

Il a fallu rabattre de beaucoup ces exigences et, le 22 mars 1843, une ordonnance a paru en France qui introduisait la nouvelle règle :

$$y = 3x$$

y et x désignent ici et dans toute la suite de cette notice, les pressions effectives d'épreuve et la pression effective habituelle, c'est-à-dire l'excès de ces pressions sur celle de l'atmosphère.

Quand on se souvient que la locomotive avait fait son entrée définitive dans le monde industriel en 1827, il faut bien reconnaître que l'ordonnance de 1843 était encore empreinte de la crainte des dangers de la vapeur à haute pression.

Le 20 décembre 1853 a paru en Belgique un arrêté royal qui introduisait les règles :

$$y = 2x \quad y = 1\frac{1}{2}x$$

La première était la règle générale ; la seconde avait rapport à des chaudières tubulaires d'épaisseur réduite, mais qui étaient soumises à une épreuve annuelle.

Le 28 mai 1869, une nouvelle loi a été donnée dans les Pays-Bas ; l'arrêté royal du 24 septembre 1869, en exécution de cette loi, donnait les règles qui suivent :

Première épreuve :

$$\begin{aligned} y &= 2x \left\{ \begin{array}{lll} \text{chaudières ordinaires} & \dots & (c) \\ \text{chaudières tubulaires} & \dots & \dots \\ \text{pour bateaux à voyageurs} & \dots & (b) \end{array} \right. \\ y &= 1\frac{1}{2}x \left\{ \begin{array}{lll} \text{chaudières tubulaires} & \dots & (b) \\ \text{dans les autres cas} & \dots & \dots \\ \text{chaudières type Belleville} & \dots & (a) \end{array} \right. \\ y &= x + \frac{1}{2} \text{ minimum de pression d'épreuve.} \\ y &= x + 4 \text{ maximum } \quad \gg \quad \gg \\ &\qquad \qquad \qquad \text{pour chaudières (a) et (b).} \\ y &= x + 6 \text{ maximum de pression d'épreuve.} \\ &\qquad \qquad \qquad \text{pour chaudières (c).} \end{aligned}$$

Epreuves ultérieures :

$$\begin{aligned} y &= 1\frac{1}{2}x \text{ pour toutes les chaudières.} \\ y &= x + \frac{1}{2} \text{ minimum de pression d'épreuve.} \\ y &= x + 4 \text{ maximum de pression pour (a) et (b).} \\ y &= x + 6 \quad \gg \quad \gg \quad \gg \quad (c) \end{aligned}$$

Cette réglementation peut paraître un peu compliquée ; ce qui mérite une remarque spéciale c'est l'application de la règle :

$$y = x + 4$$

dans une époque antérieure de vingt ans, lorsque l'application des hautes pressions dans les machines marines était encore bien rare. Il faut admettre que cette règle n'était pas très sévère pour les constructeurs.

En 1871, l'Allemagne a introduit les deux règles :

$$y = 1\frac{1}{2}x \quad \text{et} \quad y = x + 5$$

En 1880, la France a adopté les règles :

$$y = 2x \quad \text{et} \quad y = x + 6$$

En 1884, la Belgique a donné les règles :

$$y = 1\frac{1}{2}x$$

et pour les épreuves ultérieures :

$$y = 1\frac{1}{4}x$$

En 1888, l'Amirauté anglaise a donné comme règle générale :

$$y = x + 6,$$

avec cette restriction, que y ne pourra surpasser la pression qui soumet les tôles à une tension des $4/9$ de la résistance à la rupture.

Toutes ces règles sont rassemblées dans le tableau graphique qui accompagne cette étude et dont une simple inspection fait voir d'une manière décisive combien les exigences ont diminué depuis le rapport de 1823, qui a donné l'initiative pour l'épreuve des chaudières par la pression hydraulique.

Evidemment la nécessité a amené cette modification dans l'opinion et l'on se demande si les exigences pourront encore descendre.

Il nous semble que non et on pourrait même dire que la règle :

$$y = x + 4$$

qui est actuellement obligatoire dans les Pays-Bas, est la limite extrême qu'il ne faudrait certainement pas dépasser.

Mais quand on limite la pression d'épreuve maximum à

$$y = x + 4,$$

alors la règle

$$y = 2x$$

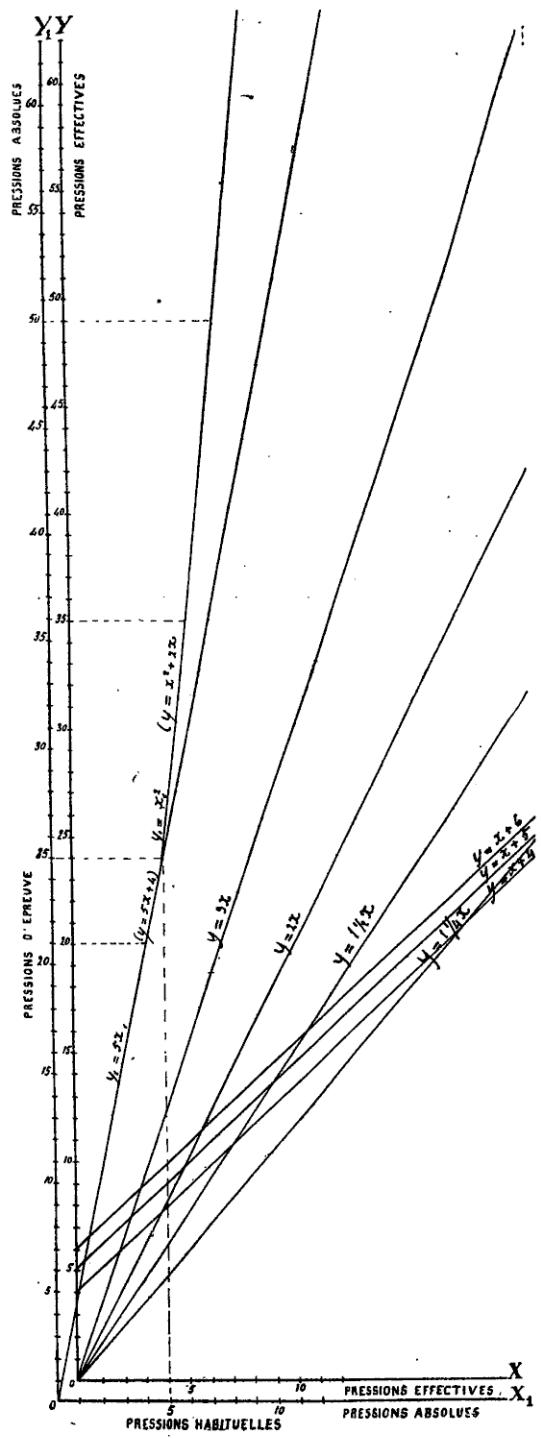
exige trop pour un grand nombre de chaudières et devrait être réduite à

$$y = 1\frac{1}{2}x$$

On pourrait donc adopter les deux règles :

$$y = 1\frac{1}{2}x \quad \text{et} \quad y_{\max} = x + 4$$

Le résultat pratique de l'emploi de ces deux règles serait comme il suit :



	Pression habituelle effective	differences	Pression d'épreuve effective	differences
$y = 1 \frac{1}{2} x$	x = 1	1	y = 1.5	1.5
	2	1	3	1.5
	3	1	4.5	1.5
	4	1	6	1.5
	5	1	7.5	1.5
	6	1	9	1.5
	7	1	10.5	1.5
	8	1	12	1.5
	9	1	13	1
	10	1	14	1
$y = x + 4$	11	1	15	1
	12	1	16	1

Cette règle aurait le défaut de n'exiger aucune surcharge pour une pression effective = 0, c'est-à-dire pour les chaudières à basse pression comme les employait le célèbre James Watt.

On pourrait y remédier en substituant la pression absolue à la pression effective, ce qui donne

$$y_1 = 1 \frac{1}{2} x_1 \text{ et } y_1 = x_1 + 4$$

ou en substituant les pressions effectives y et x

$$(y+1) = 1 \frac{1}{2} (x+1) \text{ et } y+1 = (x+1) + 4$$

ou bien :

$$y = \frac{1}{2} (3x+1) \text{ et } y = x + 4$$

Pour $x = 0$ on aurait $y = 1/2$.

Mais la règle est plus compliquée, et l'on pourrait obtenir le même résultat en adoptant une pression d'épreuve minimum de

$$y = x + \frac{1}{2}$$

qui du reste ne servirait que dans des cas très rares.

L'ensemble des règles serait donc :

Pression d'épreuve minimum	$y = x + \frac{1}{2}$
» » générale.	$y = 1 \frac{1}{2} x$
» » maximum	$y = x + 4$

ou bien en chiffres :

	Pression habituelle effective	différences	Pression d'épreuve effective	différences
$y = x + \frac{1}{2}$	$x = 0$	1	$y = 0.5$	1
	1	1	1.5	1.5
	2	1	3	1.5
	3	1	4.5	1.5
	4	1	6	1.5
$y = 1 + l_2 x$	5	1	7.5	1.5
	6	1	9	1.5
	7	1	10.5	1.5
	8	1	12	1.5
	9	1	13	1
$y = x + 4$	10	1	14	1
	11	1	15	1
	12	1	16	1

Avec des exigences aussi réduites on ne voit pas la nécessité de rabaisser encore la limite pour les épreuves ultérieures ou bien pour les chaudières à tubes d'eau ou d'autres types qui pourraient être introduits.

Une chaudière quelconque doit certainement pouvoir subir la pression d'épreuve désignée pour être employée avec sécurité.

Mais le but de cette notice n'est pas de formuler une règle en plus de celles qui sont obligatoires dans les différents Etats; plutôt de fixer l'attention sur un « desideratum » de grand intérêt, c'est-à-dire *l'uniformité* des règles à employer dans les divers Etats.

Dans un grand nombre de cas une chaudière peut franchir la frontière de l'Etat où elle a été construite ou même employée pendant un certain temps.

Or, dans ce cas, les exigences auxquelles elle est soumise changent pour chaque frontière, et il serait très désirable que l'on put s'accorder sur une règle uniforme pour tous les Etats civilisés.

Ceci pourrait être obtenu par une conférence internationale composée de délégués des diverses nations, qui formeraient une règle générale pour tous les Etats qui auraient pris part à la conférence.

Si le Congrès de mécanique, auquel cette notice est adressée, pouvait faire faire un pas décisif dans cette direction, tous les fabricants de chaudières lui seraient bien obligés (!).

Il y a encore une observation de grand intérêt à faire sur ce sujet.

Lors même qu'on se serait mis d'accord sur la pression d'épreuve, il reste une incertitude quant à l'épaisseur minimum à donner aux tôles pour la partie cylindrique.

L'amirauté anglaise, sur la proposition de M. Sennett, a statué que la tension

- Le temps n'a pas permis au Congrès de discuter cette question.

dans les tôles à la pression d'épreuve ne saurait dépasser les $4/9$ de la tension de rupture.

On peut différer d'opinion sur ce nombre, mais une limite est certainement désirable.

La conférence proposée pourrait donc compléter son travail si utile en statuant une règle pour la limite de la tension dans les tôles des parties cylindriques à la pression d'épreuve.

C'est dans ce sens que je propose au Congrès de s'exprimer par exemple comme il suit :

« Le Congrès de mécanique appliquée exprime le vœu qu'un des états de l'Europe prenne l'initiative pour obtenir l'uniformité dans :

« 1^o Les règles qui déterminent la relation entre la pression d'épreuve et la pression habituelle dans les chaudières à vapeur ;

2^o La limite des tensions à admettre dans les tôles des parties cylindriques des chaudières à vapeur à la pression d'épreuve. »

Puisque c'est la France qui, par la commission de 1823, a inauguré l'emploi de l'épreuve hydraulique des chaudières qui depuis est généralement admise, il nous semble que de cet Etat pourrait partir l'invitation aux autres Etats pour régler cette matière d'un intérêt si général.

CHAUDIÈRE DE LOCOMOTIVE WEBB

à foyer ondulé rectangulaire

(Planches 1-2)

Figure 1. — *Coupe longitudinale-médiane par l'axe de la chaudière et du foyer.* — Cette figure représente très clairement l'ensemble de la chaudière. Le corps cylindrique est du type ordinaire télescopique, c'est-à-dire à viroles de diamètres décroissant vers la boîte à fumée, et en tôles d'acier de 13 millimètres d'épaisseur. On a supprimé les tirants longitudinaux ordinairement employés pour empêcher la plaque tubulaire de la boîte à fumée et la plaque d'arrière de la boîte à feu de céder à la pression. La plaque tubulaire est consolidée par quatre goussets et la plaque d'arrière par deux tirants inclinés, de 32 millimètres de diamètre, qui la raccordent aux cornières de suspension des poutrelles du foyer.

Les tubes, au nombre de 196, de $47^m/m,5$ de diamètre extérieur, sont courbés de 50 millimètres au milieu, de manière à pouvoir suivre plus facilement les dilatations et les contractions du corps cylindrique, et à diminuer, en même temps que leur fatigue, les fuites aux sertissages dans les plaques tubulaires.

Le foyer, entièrement en acier, est construit de manière à lui laisser le plus de liberté possible dans ses dilatations et ses contractions. Toutes les tôles, à l'exception de celle du bas, sont ondulées; entièrement entouré d'eau le foyer n'a de cadre ni au bas ni autour de la porte. Les poutrelles mêmes sont rattachées à des supports articulés de façon qu'elles ne gênent en rien les dilatations et les contractions du foyer; elles sont, en effet, simplement suspendues aux cornières du ciel de la boîte à feu par deux boulons de 50 millimètres de diamètre, qui les traversent librement. Le haut du foyer se prolonge dans la chaudière où il forme une chambre de combustion qui, bien qu'elle raccourcisse les tubes, ne diminue pas la puissance de vaporisation de la chaudière, et augmente le rendement du foyer.

Comme nous l'avons dit plus haut, la tôle de fond du foyer n'est pas ondulée, mais placée de manière à éviter toute accumulation de dépôts. D'ailleurs, comme cette partie de la chaudière en est la plus froide, les effets des contractions et des dilatations y sont moins prononcés que partout ailleurs.

Dans cette chaudière le cendrier ordinaire est remplacé par une enveloppe d'eau qui améliore considérablement la circulation. Cette forme de cendrier a

été appliquée avec succès sur un certain nombre des locomotives compound de M. Webb.

Figure 2. — Cette figure laisse voir en plan-coupe une moitié du foyer et la porte du cendrier. On y distingue clairement l'assemblage des tôles du foyer avec celles de la boîte à feu autour de cette ouverture. On voit, sur l'autre partie de la coupe, la position des entretoises d'acier, les ondulations des parois latérales et de la tôle d'arrière du foyer.

Figure 3. — Vue d'arrière du foyer, montrant la position de la porte, des entretoises et des tirants d'acier, des ouvertures de montage des injecteurs, chapelles de refoulement, robinetterie, etc.

Figure 4. — La demie coupe transversale de gauche, en regardant la boîte à fumée vers le foyer, indique plus particulièrement le nombre et la disposition des tubes, la suspension des poutrelles. La demie coupe de gauche représente la forme de la plaque tubulaire de la boîte à fumée et la position des goussets qui la relient au corps cylindrique. Ces deux coupes laissent aussi voir l'ouverture ménagée dans l'avant du foyer pour loger le registre et retirer les cendres du cendrier.

CHAUDIÈRE DE LOCOMOTIVE WEBB à foyer d'acier ondulé cylindrique

(Planches 3-4)

Figure 1. — *Coupe longitudinale médiane par l'axe de la chaudière et du foyer.*

Le corps cylindrique est le même que celui de la chaudière précédente à foyer rectangulaire.

Le foyer, entièrement en acier, affecte, en coupe transversale, la forme d'un 8, qui n'exige que très peu d'armatures : il est constitué par la réunion de deux cylindres superposés coupés l'un vers le haut, l'autre au bas, et raccordés au niveau de la porte de chargement (fig. 2) par un joint à recouvrement.

C'est par l'ouverture ainsi ménagée à l'intersection des deux cylindres du foyer que l'on charge le combustible sur la grille placée au bas, du cylindre inférieur, d'où les gaz chauds passent aux tubes au travers du cylindre supérieur et de la chambre de combustion, constituée comme celle de la chaudière précédente, par le prolongement de la partie supérieure du foyer et armée par des pou-

trelles suspendues au berceau du corps cylindrique comme celles du foyer précédent.

Les tôles qui constituent les cylindres du foyer sont assemblées par des joints d'Adamson rivés et matés sur des tôles qui constituent une sorte de cadre d'armature entre les cylindres, en même temps qu'elles ferment l'avant de leur raccordement. Les tôles d'avant et d'arrière du foyer, dont l'une raccorde en même temps le foyer à la chambre de combustion, sont renforcées par des corrugations circulaires qui leur donnent en même temps l'élasticité nécessaire pour céder sans fatigue aux dilatations.

On a pu se passer, dans cette chaudière, de la voute en briques réfractaires si fréquemment usitée avec les foyers rectangulaires ; on s'est contenté d'un simple écran réfractaire en trois briques, dont celle du milieu forme clef, et qui protège du contact immédiat des flammes les rivets du joint central d'Adamson.

Le fond de la boîte à feu est pourvu d'un long trou de vidange pour en retirer les dépôts.

Les formes des différentes parties de ce foyer sont simples, faciles à reproduire, et leur rivetage peut être exécuté tout en entier à la machine.

Figure 2. — Cette figure donne deux *coupes transversales du foyer* : L'une, suivant A B, montre le raccordement des deux cylindres par un joint à recouvrement entretoisé avec la partie correspondante de la boîte à feu ; on y voit aussi une partie de l'écran réfractaire mentionné plus haut. L'autre demie coupe indique la position des six tirants transversaux qui unissent, au travers de l'enveloppe d'eau, les parois latérales de la boîte à feu.

Figure 3. — *Vue par bout et demie coupe transversale du corps cylindrique en regardant vers le foyer.*

On voit, sur l'élévation, la position de la porte de chargement et des entretoises ; la demie coupe montre la porte du cendrier, la plaque tubulaire de la chambre de combustion, la même que dans la chaudière précédente, et aussi la méthode adoptée pour supporter sur les longerons l'arrière de la chaudière. Ces supports sont constitués par une sorte de berceau en tôle, de 8 millimètres d'épaisseur sur 1^m,38 de long et rabattu sur les longerons. Le foyer repose sur cette sorte de sangle par deux bandes de fer de 100 millimètres de large sur 25 millimètres d'épaisseur et 1^m,50 de long, rivées à ses extrémités. Le foyer est donc complètement libre de se dilater quand sa température augmente.

Figure 4. — *Plan-coupe de la chaudière et du foyer.* — La demie coupe par l'axe de la chaudière montre le raccordement de la chambre de combustion et du foyer.

Figure 5. — *Plan-coupe du foyer.* — Cette figure montre très clairement la disposition des entretoises. On voit, sur la dernière coupe G H, les tirants transversaux qui relient, entre l'avant des cylindres du foyer, les parois opposées

de la boîte à feu. Le raccordement des cylindres est relié à la paroi de la boîte à feu par des entretoises boulonnées (fig. 6).

La demie coupe I J montre l'entretoisement des tôles d'extrémité du foyer par des entretoises semblables à celles de la chaudière précédente.

Timbre de la chaudière : 10 kilogrammes par centimètre carré.

La figure 7 représente, à l'échelle de 1/3, l'une de ces entretoises en acier. Leur diamètre au centre est réduit de manière à leur donner en plein corps une section égale à celle du fond des filets ; on les rend ainsi aussi flexibles que possible. On a percé à chaque bout un trou de 25 millimètres de profondeur et de 10 millimètres de diamètre, que l'on sertit à la broche après la pose de l'entretoise.

NOTE SUR UNE CHAUDIÈRE A VAPEUR

(Système Rocour)

Notre système de chaudières est une combinaison de la chaudière tubulaire et de la chaudière Field avec une construction spéciale de la boîte à feu.

Pour réaliser les hautes pressions réclamées par les machines économiques modernes à triple expansion, etc., il faut ou augmenter démesurément les épaisseurs des tôles ou recourir soit aux chaudières à petits éléments tubulaires, soit à la chaudière de locomotive.

Aucune de ces chaudières ne nous paraît réunir simultanément les *desiderata* suivants :

- 1^o Foyer et chambre de combustion entourés de parois mouillées ;
- 2^o Division des flammes et gaz également et méthodiquement sur toute la surface de chauffe, de façon à donner à celle-ci la production économique de vapeur maximum ;
- 3^o Possibilité du nettoyage interne et externe ;
- 4^o Solidité — simplicité — légèreté de construction d'où résultent la sécurité et le bas prix ;
- 5^o Bonne circulation — vapeur sèche.

Ces divers points sont réalisés par une extension d'application des tubes Field employés verticalement (bien que notre système puisse les utiliser aussi horizontalement).

Il est reconnu que la chaudière Field verticale bien proportionnée, est une très bonne chaudière dans les petites dimensions. La Société Cockerill l'a adoptée avec grand succès pour les locomotives d'usines à deux essieux.

Toutefois, quand le diamètre du foyer devient assez grand, la plaque tubulaire arrive à des épaisseurs peu pratiques et même dangereuses si elle n'est pas soutenue par des entretoises spéciales. Ainsi, dans les bateaux transports Cockerill de la Meuse, cette épaisseur atteint 40 millimètres pour un timbre de 6 atmosphères.

De plus, la circulation de la flamme doit se faire plus ou moins horizontalement dans une partie du faisceau tubulaire pour arriver à la cheminée centrale, de sorte qu'une partie seulement de la surface du tube est léchée par la flamme.

Nous évitons cet inconvénient en disposant nos tubes Field symétriquement par 3, 4, 6 ou 8 (ou plus) autour de chaque tube à fumée d'un faisceau qui réunit, en formant autant d'entretoises, la plaque tubulaire Field à une deuxième plaque tubulaire fermant la chaudière vers le haut.

En adoptant le nombre de 8 tubes Field autour d'un tube à fumée, nous pouvons disposer les tubes à fumée en échiquier, de telle sorte qu'ils se présentent en rangées parallèles suivant deux directions perpendiculaires.

Entre chaque rangée on peut introduire les tubes Field, soit à la main, soit avec une pince spéciale et les fixer en place d'un coup de maillet. Il est facile aussi de nettoyer l'extérieur des tubes au moyen de grattoirs passés entre les rangées, quand on a soulevé le corps de chaudière au-dessus des plaques tubulaires auxquelles il est boulonné.

Les tubes à fumée sont sertis dans les plaques comme dans les locomotives, les trous des plaques étant un peu coniques et fraisés vers l'extérieur de telle sorte que le bout du tube rabattu dans la partie fraisée fait bourrelet d'entretoise.

On pourrait également fileter les tubes en tubes tirants comme dans les chaudières marines, mais nous ne le trouvons pas nécessaire.

Nous préférons les tubes étirés d'acier doux pour tubes à fumée comme présentant le plus de résistance et de ductilité simultanément.

Les petits tubes Field sont en fer ou mieux en cuivre ou en laiton. L'orifice présente un évasement tronconique correspondant exactement à l'alésage conique de la plaque tubulaire.

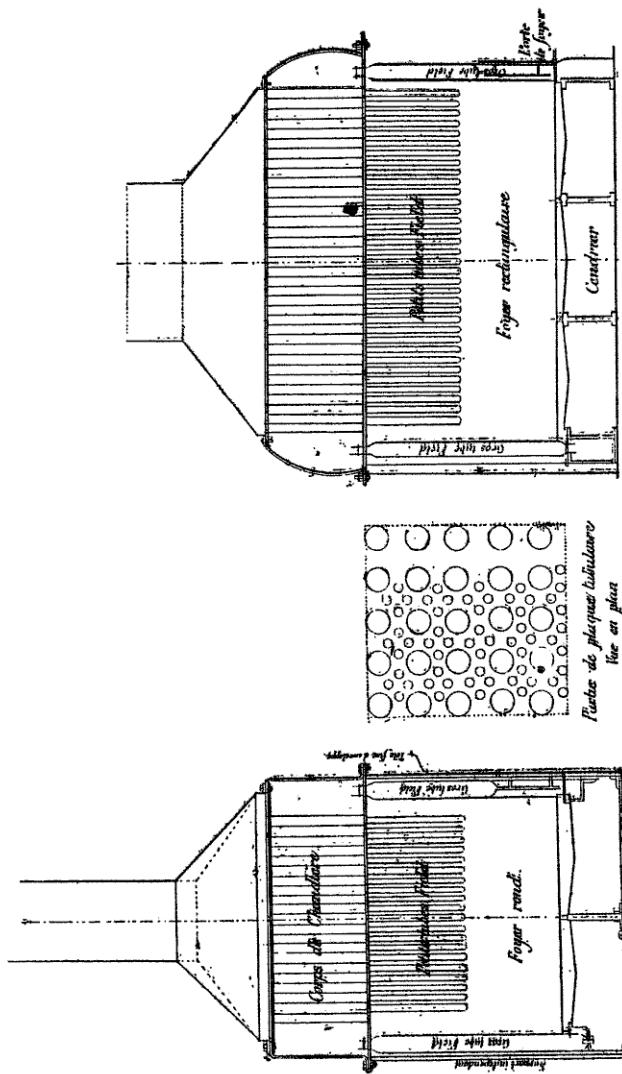
Avec des tubes à fumée de 48 millimètres intérieur, 54 extérieur, soit 3 millimètres d'épaisseur, nous employons des Field de 28 millimètres intérieur, 32 millimètres extérieur (2 millimètres d'épaisseur). L'écartement des tubes à fumée d'axe en axe est 105 millimètres. Dans ces conditions, une plaque tubulaire inférieure de 20 millimètres et une plaque supérieure de 15 millimètres permettraient une pression d'épreuve de 30 atmosphères.

Avec ces dimensions, nous avons trouvé que 0^m,50 pour les tubes Field est une longueur convenable et 0^m,55 également pour les tubes à fumée. Ce surplus de longueur de ceux-ci permet d'introduire ou de retirer un tube Field debout entre eux.

En estimant la surface de chauffe par l'intérieur pour les tubes à fumée et par l'extérieur pour les tubes Field, on voit que pour les dimensions ci-dessus (qui peuvent d'ailleurs être modifiées de diverses manières) on a pour surface tubulaire correspondant à $0,105 \times 0,105 = 1,1$ décimètre carré de grille.

0 ^m ,55 de tube fumée	= 8,3 décimètres carrés.
4 fois 0 ^m ,50 Field	= 20,2
	28,5

CHAUDIÈRE À VAPEUR, SYSTÈME ROCOUR



soit 23 mètres carrés de surface tubulaire par mètre de grille, proportion très convenable.

Si l'on admet que le niveau d'eau est maintenu à mi-hauteur du tube à fumée, on voit que :

$\frac{1}{2}$ de 8,3 décimètres carrés. = 4,15 décimètres carrés de surface de surchauffe.

et $4,15 + 20,2 \dots \dots = 24,35$ de chauffe.

ou environ $\frac{1}{7}$ de la surface tubulaire en surchauffe.

Mais la surchauffe ne se faisant qu'en dernier lieu, c'est-à-dire par des gaz très refroidis, ne présente aucun danger pour les tubes.

On peut toujours régler le niveau d'eau de façon à l'augmenter ou à la diminuer selon le *priming* observé.

La boîte du foyer est constituée par de gros tubes Field, de préférence en acier, posés jointivement de façon à limiter une grille circulaire ou rectangulaire par un ensemble de cloisons verticales ou inclinées, en quelque sortes cannelées. Ces tubes sont étranglés sur eux-mêmes comme l'est un goulot de bouteille, de façon à pouvoir être sertis, sans trop l'affaiblir, dans le pourtour de la plaque tubulaire Field.

Vers le bas, chaque tube présente un bouchon à vis de nettoyage. On pourrait toutefois réunir ces tubes par un collecteur de nettoyage faisant ou non paroi de cendrier. Toutefois, ces tubes Field étant prolongés sous la grille, les sédiments qu'y réunit la circulation générale peuvent y séjourner sans danger. Ces tubes, librement suspendus, conservent toute leur liberté de dilatation, le corps supérieur de la chaudière reposant sur le cendrier ou autrement par supports spéciaux indépendants.

Le corps supérieur de la chaudière est un anneau rivé ou mieux soudé avec deux brides embouties : l'inférieure en dehors pour se boulonner au pourtour de la plaque tubulaire Field, la supérieure en dedans pour recevoir les prisonniers du pourtour de la plaque tubulaire supérieure.

A la forme annulaire on peut substituer, pour des grilles rectangulaires, des parois bombées extérieurement suivant des cylindres à génératrices horizontales en relation avec le rectangle de la grille et des plaques tubulaires. Un anneau en fil de cuivre fait un joint étanche parfait entre les plaques tubulaires et le corps de chaudière si les surfaces de joint sont bien dressées.

Nous donnons de 80 à 100 millimètres de diamètre et 4 millimètres d'épaisseur aux gros tubes Field de boîte à feu. Leur longueur est un peu plus du double des petits tubes Field, de façon à laisser 0^m,40 au moins entre la grille et le bas de ceux-ci.

Dans ces conditions, les parois de la boîte à feu ne pèsent guère plus du tiers du poids réalisé par les plaques de 12 ou 15 millimètres entretoisées des loco-

motives, et les armatures de ciel de foyer sont supprimées. La surface présentée au rayonnement du foyer est en outre accrue de 50 % environ, comme dans les foyers à parois ondulées (Fox, etc.).

Il est facile de constater que les flammes, après s'être bien développées dans une vaste chambre de combustion, montent verticalement en se divisant à l'extrême entre les tubes Field sans aucun étranglement, puis passent dans les tubes à fumée, suivant toujours le même trajet direct, de sorte que l'allumage est très facile même avec faible cheminée, et la production de vapeur par mètre carré chauffé est énorme.

Les plaques tubulaires n'étant jamais soumises au rayonnement direct du foyer et n'étant atteintes que par des gaz ayant léché les 5/6 au moins de la surface de chauffe ne sont sujettes à aucun accident.

En adoptant les dispositions du corps de chaudière pour grilles rectangulaires, on peut atteindre une surface de chauffe aussi grande qu'on veut, par unité de chaudière, et couvrir de surface de grille presque toute la surface horizontale disponible, ce qui peut être important dans la marine.

On pourrait aussi disposer, dans ces conditions, d'une chaudière de locomotive ayant plus de 5 mètres carrés de grille tout en restant intérieure complètement aux roues motrices, ou même jusqu'au double en passant au-dessus de celles-ci (pour machines à marchandises), seulement il faudrait des portes de foyer en avant et en arrière.

Quant au coût de construction, il est facile de vérifier qu'il est peu élevé. Nous avons trouvé par deux commandes comparatives que pour une même surface de chauffe de 30 mètres carrés et de 1,15 mètres carrés de grille, notre chaudière avec tubes Field en cuivre a coûté moins qu'une chaudière genre loco-mobile à tubes en fer, ce qui s'explique par le poids presque triple de celle-ci. Cependant la première était timbrée à 12 et la deuxième à 10 atmosphères seulement.

Nous signalerons aussi notre système de parois de boîte à feu en tubes jointifs étranglés au bout pour sertissage en plaque tubulaire ou toute autre pièce de connexion, peut être appliquée à tout autre système de chaudière, totalement ou partiellement, en plaçant ces tubes verticalement inclinés ou même horizontalement.

Chaudière multitubulaire à circulation

Système de Dion, Bouton et Trépardoux

PROGRAMME

Produire le maximum de puissance sous le minimum de poids et de volume.

DESCRIPTION

Cette chaudière est verticale et cylindrique. Elle se compose de trois cylindres concentriques : l'enveloppe, le foyer et le bouilleur central.

L'enveloppe est elle-même formée de deux tronçons, l'un inférieur qui est rivé au foyer, sur tout le pourtour de la collerette inférieure de celui-ci et à l'endroit du cadre du gueulard ; l'autre supérieur réuni au premier tronçon et au foyer par des collerettes et couronnes à joints boulonnés et par conséquent démontable.

Le bouilleur central est fermé, à sa partie inférieure par un fond embouti soudé aux parois, et à sa partie supérieure, par un couvercle boulonné sur une collerette rivée.

Le bouilleur central et le foyer sont réunis par un certain nombre de tubes rayonnants et inclinés constituant le faisceau tubulaire.

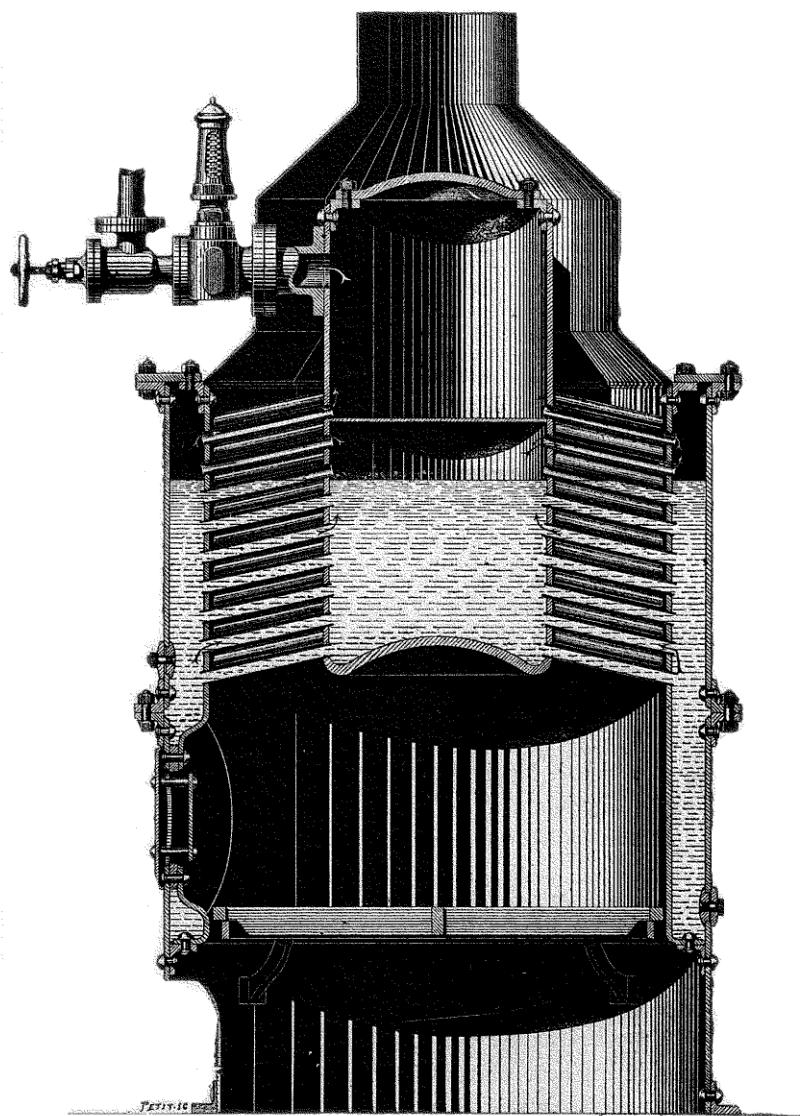
La disposition de ces tubes est telle que chacun d'eux se trouve immédiatement au-dessus de l'espace libre laissé entre deux tubes de la rangée précédente. Ce bouilleur central est divisé, dans sa hauteur par une cloison horizontale, placée entre la deuxième et la troisième rangée des tubes supérieurs, ce qui constitue ainsi deux compartiments : l'un réservé à l'eau, l'autre destiné à emmagasiner la vapeur sèche.

La chaudière est complétée par : une tubulure de prise de vapeur fixée à la partie supérieure du bouilleur central sur laquelle sont placés les soupapes de sûreté et tous les robinets de prise de vapeur ; par la boîte à fumée, la grille, la robinetterie et les autoclaves.

Tous les joints boulonnés sont dressés sur le tour et l'étanchéité en est obtenue par l'interposition, entre les deux surfaces métalliques, d'un fil de cuivre rouge.

Les tubes sont dudgeonnés à leurs deux extrémités, à la façon ordinaire, mais

non bagués. Ces tubes sont en acier doux sans soudure. Le foyer et le bouilleur central sont en tôle de fer, qualité Creusot n° 6, l'enveloppe est en même tôle qualité Creusot n° 5.



Quatre autoclaves sont répartis sur le pourtour du tronçon inférieur et un cinquième est placé sur le tronçon supérieur. Le timbre de cette chaudière est de

10 kilogrammes pour la série courante ; mais pour des cas spéciaux, s'élève à 12 et 15 kilogrammes.

Pour opérer le nettoyage intérieur, il suffit de démonter la boîte à fumée, la tubulure de prise de vapeur, les deux joints boulonnés et d'enlever le tronçon supérieur de l'enveloppe. On a alors mis à nu tout le faisceau tubulaire et la partie annulaire qu'il est facile de nettoyer en entier. Pour la visite du bouilleur central, il suffit de démonter le bouchon supérieur de ce bouilleur et la cloison qui est assemblée en quatre morceaux.

Quant au nettoyage extérieur, il consiste en un simple ramonage du faisceau tubulaire auquel on procède avec une lance à vapeur qu'on introduit successivement par les portes de la boîte à fumée et par la porte du foyer et au moyen de laquelle on projette par dessus et par dessous un jet de vapeur dans toutes les directions et dans tous les vides laissés entre les tubes.

FONCTIONNEMENT

Après cette description, il est facile de se rendre compte du fonctionnement de la chaudière c'est-à-dire du mouvement des gaz, de l'eau et de la vapeur.

La chaudière est remplie d'eau jusqu'au tiers environ de la hauteur du tube de niveau, de façon qu'en marche le niveau normal soit à la moitié de la hauteur de ce tube ce qui correspond sur le cylindre du foyer, au-dessous de la quatrième rangée des tubes supérieurs. Les deux rangées au-dessus de la cloison sont les tubes sécheurs et les deux rangées au-dessous sont les tubes de retour d'eau.

Les gaz produits par la combustion sur la grille cherchent à s'élever, par le chemin le plus direct, dans la boîte à fumée, pour gagner l'atmosphère. Mais la disposition en quinconce du faisceau tubulaire contrarie leur marche, en ralentit la vitesse, les force à se diviser à chaque rangée de tubes et à se dépouiller de la plus grande quantité possible des calories qu'ils contiennent.

La loi du mouvement de ces gaz peut être représentée par un escalier dont chaque décrochement correspond à une rangée de tubes et dont la rampe serait inclinée à 60° sur l'horizontale. Le chemin parcouru de cette façon est environ 60 % plus long que la verticale.

La hauteur du faisceau a été déterminé expérimentalement pour que la température des gaz à leur arrivée dans la boîte à fumée ne dépasse pas 250°. Cette température ne présente pas un écart assez différent de celle de la vapeur à 10 kilogrammes (183°) pour être utilisée à la vaporisation ; elle est insuffisante pour rougir les tubes sécheurs, mais elle constitue une excellente enveloppe pour la chambre à vapeur qui se maintient dans un parfait état de siccité, sans surchauffe.

On remarquera que le serrage des tubes du bouilleur central tend à écarter les gaz, et que le tirage, au contraire, tend à les ramener ; de là une répartition uniforme sur toute la section du faisceau tubulaire.

On remarquera également que par la disposition inclinée des tubes, le faisceau tubulaire forme un ensemble élastique en suspension : on reproche aux chaudières multitubulaires le dessertissage des tubes provenant de leur différence de dilatation avec celles des plaques à tubes.

Dans notre cas, la faible longueur des tubes (0^m,500 au maximum) et la petite variation que leur inclinaison permet, assurent un libre jeu à la dilatation dans des limites bien supérieures à celles qui peuvent se présenter.

L'inclinaison des tubes facilite le dégagement des bulles de vapeur vers le bouilleur central, et il s'établit dans chaque tube vaporisateur, une circulation excessivement active de la périphérie vers le bouilleur central, de sorte que, quelle que soit l'intensité du feu, même au tirage très forcé, tous les tubes vaporisateurs sont rafraîchis d'une façon permanente par un courant d'eau continuellement renouvelé.

Il ne peut jamais arriver qu'une portion de tubes se trouve exposée au feu à la suite du passage d'une forte bulle de vapeur.

Cette active circulation a pour résultat important d'atténuer, en grande partie, l'adhérence des dépôts lorsqu'on emploie des eaux calcaires, supprime les dépôts boueux et évite la température exagérée, dangereuse même, du métal, lorsque celui-ci est recouvert d'une couche de tartre et d'une lame d'eau tranquille.

Tout les tubes vaporisateurs sont autant de conduits donnant lieu, par leur débit dans le tube central, à une émulsion tumultueuse qui fait monter le niveau de l'eau jusqu'à la cloison centrale, c'est-à-dire plus haut que le niveau normal de la partie annulaire.

Ce mélange d'eau et de vapeur se précipite par tous les orifices qui sont sur son passage et se rend, par les tubes de retour, dans la partie annulaire, où se sépare, de la vapeur, l'eau vaporisée, et où la vapeur, encore humide, se trouve dans un milieu tranquille.

La vapeur continue sa marche en passant lentement par les tubes sécheurs pour se rendre dans le compartiment à vapeur du bouilleur central où elle arrive complètement dépouillée des molécules d'eau qu'elle a pu entraîner pendant la vaporisation.

En raison du rapport des sections, la vitesse de la vapeur dans les tubes sécheurs est environ vingt fois moins grande que celle qu'elle a dans la tubulure de prise de vapeur, lorsque la vanne de débit est ouverte en grand; l'alimentation de cette chaudière doit être continue comme pour toutes les chaudières à petit volume d'eau et s'obtient, soit avec un cheval alimentaire, soit avec la pompe alimentaire d'une machine, l'injecteur n'étant qu'un appareil de secours.

Les avantages de ce type de chaudière sont assez nombreux ; nous allons les résumer :

- 1° Grande surface de chauffe sous un petit volume et un poids restreint ;
- 2° Démontage facile et rapide ;
- 3° Dilatation libre du faisceau tubulaire ;
- 4° Grande utilisation du combustible ;
- 5° Circulation très active ;
- 6° Mise en pression rapide ;
- 7° Production considérable de vapeur par mètre carré de surface de chauffe ;
- 8° Vapeur sèche ;
- 9° Économie de combustible ;
- 10° Élasticité de production, telle qu'on peut, suivant les besoins, tripler la production de vapeur par un tirage artificiel, tout en restant dans d'excellentes conditions de marche pratique, c'est-à-dire sans aucun entraînement d'eau, et en conservant une pression stable et une utilisation inférieure seulement de 9 % à celle du tirage naturel.

La production de vapeur par unité de surface de chauffe varie de 25 à 75 kilogrammes à l'heure, avec une utilisation passant de 7 kilg. 300 à 6 kilg. 680 de vapeur par kilogramme de charbon, suivant que la combustion varie de 75 à 250 kilogrammes de charbon par mètre carré de grille et par heure.

La contenance en eau est d'environ 15 à 18 kilogrammes par mètre de surface de chauffe, c'est-à-dire 60 % de la production à tirage naturel, et 20 % de cette production à tirage forcé.

Le compartiment à vapeur ne contient qu'environ 10 à 11 litres de vapeur par mètre de surface de chauffe.

Il est difficile de parler des avantages de cette chaudière sans prendre, comme point de comparaison d'autres chaudières dont tout le monde connaît la valeur.

Sans vouloir porter ombrage à personne, nous devons à la vérité de dire que des essais comparatifs ont été faits avec des chaudières multitubulaires, dites inexplosibles, avec des chaudières Field, à bouilleurs croisés ou tubulaires à retour de flamme. Ces essais ont révélé que, dans conditions de marche identique, la chaudière de Dion, Bouton et Trépardoux, fournit, à poids et à volume égal, de deux à trois fois plus de puissance que les chaudières ci-dessus mentionnées, tout en réalisant une économie de charbon s'élevant, dans certains cas, jusqu'à 46 %.

EXAMPLE :

Un essai fait chez MM. Sautter-Lemonnier et C^{ie}, sur une locomotive à lumière électrique, qu'on a fait fonctionner successivement, avec une chaudière Field et avec une de nos chaudières.

Nous donnons ci-dessous les résultats de cet essai :

*Essais comparatifs de chaudières faits par
MM. Sautter, Lemonnier et Cie
sur une locomobile à lumière électrique
Août 1888*

DÉSIGNATIONS .	SYSTÈME Field	SYSTÈME De Dion, Bouton et Trépardoux N. 7
Puissance développée, en chevaux électriques.	5	5,7
Nombre d'ampères	68	75
Nombre de volts.	56	56
Largeur et longueur du parallélépipède circonscrit, en mètres.	1,04	0,75
Hauteur du parallélépipède circonscrit, en mètr.	1,85	1,56
Volume — — en m. cub.	1,571	0,88
Poids de la chaudière { sans eau en kilogrammes	1700	650
{ avec eau — . . .	2200	760
par cheval électrique en kilogrammes . . .	440	133
Surface de chauffe, en mètres carrés.	8,40	5,95
Surface de grille, — —	0,4536	0,2827
Dépense de charbon par heure, en kilogrammes	56	40
{ par heure en kilogrammes . .	280	257
{ par kilogr. de charbon en kilog.	5	6,42
par cheval électrique. . . .	56	45
Chevaux électriques { par tonne de poids . .	2,27	7,5
par m. c. de volume. .	3,18	6,47
Vapeur sèche produite par kilog. de charbon en kilog.	4,01	6,42

Les applications de cette chaudière sont assez nombreuses. Viennent, en première ligne, tous les appareils mobiles, tels que : tramways à vapeur et voitures automobiles, locomobiles à lumière électrique à l'usage de l'armée ; toutes les locomobiles, en général pour exploitations agricoles, forestières, travaux publics, épuisements, etc., etc.; force motrice pour bateaux, pompes d'arrosage et d'incendie.

Quant aux installations fixes, la plus importante application est, à coup sûr, l'éclairage électrique dans les locaux déjà construits, où la plupart du temps on ne dispose que d'un emplacement très restreint. Vient ensuite la force motrice pour toutes les petites industries qui ne demandent qu'une puissance de 1/4 de cheval à 4 chevaux environ : les machines élévatrices, les treuils, etc., etc.

NOTE

SUR

l'Utilisation des Mauvais combustibles

**FOYERS A COMBUSTION MÉTHODIQUE
CHARGEMENT MÉCANIQUE DU COMBUSTIBLE**

PAR

M. G. ALEXIS GODILLOT

Avant de décrire les procédés que nous avons imaginés pour la combustion des mauvais combustibles, je désire dire quelques mots sur ces combustibles.

C'est la tannée tout humide, puis les copeaux encore imprégnés d'eau, résidus des fabriques d'extraits qui furent l'objet de nos premières recherches.

Pour donner une idée de la pauvreté de ces matières examinons, par exemple les copeaux résidus de la fabrication des extraits de bois de châtaignier.

Ces copeaux sortant de la décoction renfermant 66 % d'humidité et 34 % de ligneux (cellulose), la capacité calorifique du ligneux étant la moitié de celle de la houille, 4000 calories au lieu de 8000, on peut remplacer les 34 de ligneux par 17 de houille. Ainsi cette matière peut être comparée à un combustible hypothétique renfermant 17 de houille et 66 d'humidité soit, en ramenant le total à 100, 20 % de houille et 80 % d'humidité. On comprend quel mauvais combustible représente cette matière, et cependant bien traitée elle peut chauffer des générateurs avec autant d'intensité que le meilleur charbon.

On conçoit que pour brûler de semblables matières la grille ordinaire soit tout à fait insuffisante. Admettons en effet qu'on soit arrivé à allumer des copeaux humides, chaque charge nouvelle vient troubler l'allure ; la matière fraîche bouché les cheminements de l'air comburant, cette masse humide éteint presque les parcelles en ignition. A chaque chargement la marche du feu est singulièrement ralentie, la combustion est pour ainsi dire compromise, on comprend que même avec de très grandes grilles on n'obtienne qu'un feu précaire insuffisant

pour chauffer un générateur d'usine. Il fallait réaliser une disposition qui évitait ces inconvénients qui réalisat, si je puis dire, la combustion méthodique.

Nous avons imaginé une grille qui remplit cet objet et nous l'avons dénommée *grille-pavillon*.

Cette grille a la forme d'un demi-cone. Elle est formée de barreaux horizontaux demi-circulaires dont le diamètre va en décroissant de la base au sommet. Ces barreaux se recouvrent comme des lames de persiennes de façon à retenir les parcelles les plus fines.

Mais pour conduire une chaudière avec un mauvais combustible il faut en brûler beaucoup. Le tableau suivant donne pour diverses matières une idée de l'encombrement qu'elles produisent.

NATURE des COMBUSTIBLES	Humidité %	Puissance calorifique	Poids de 1 mètre cube	Poids de matière équivalente à 1000kg de charbon	Volume de matière équivalente à 1000kg de charbon
Tannée humide	68	800	500kg	1000kg	20 m ³ »
Tannée essorée	52	1400	330	5700	17 »
Copeaux (fabrique d'extraits) . .	62	1200	500	6600	13 »
Sciure humide	40	2000	300	4000	14 »
Bagasse humide (déchets de canne à sucre)	55	1500	150	5300	35 »
Cossette (déchets de canne traitée par diffusion)	60	1100	200	7300	36 »
Copeaux secs (chêne)	14	3200	260	2500	10 »
Balle de riz	12	3300	140	2400	17 »
Déchets de lin	29	2600	260	3200	12 »
Tourbe	65	2000	600	4500	10 »

La dernière colonne du tableau représente les volumes équivalents à une tonne de houille. Ainsi pour remplacer une tonne de charbon, il faut brûler 20 mètres cubes de tannée humide, 35 mètres cubes de bagasse.

Le chargement à main de ces énormes volumes entraîne une main-d'œuvre coûteuse, provoque des ouvertures incessantes de la porte du foyer, de là des rentrées d'air défavorables. Un chargement mécanique s'imposait ; la forme de la grille-pavillon se prêtait singulièrement à cette combinaison. Il suffit de diriger un courant continu du combustible sur le sommet de la grille conique pour qu'il se distribue dans toutes les directions de la demi-circonférence.

L'alimentation mécanique se fait au moyen d'une hélice en fonte que nous avons désignée sous le nom de *hélice à ailette croissant*. Les lignes présentant

des fragments irréguliers, filamenteux, la tannée, la bagasse, etc., etc., s'écoulent difficilement, pour que les parcelles descendent sûrement dans les filets de l'hélice, et ne puissent s'y bourrer, l'âme de l'hélice, au lieu d'être cylindrique a la forme d'un cône dont la pointe est dirigée vers la sortie, l'intervalle entre les filets de l'hélice (auget) présente une capacité qui va en croissant, de cette façon l'hélice peut puiser de la matière sur toute la longueur de la trémie au fond de laquelle elle tourne.

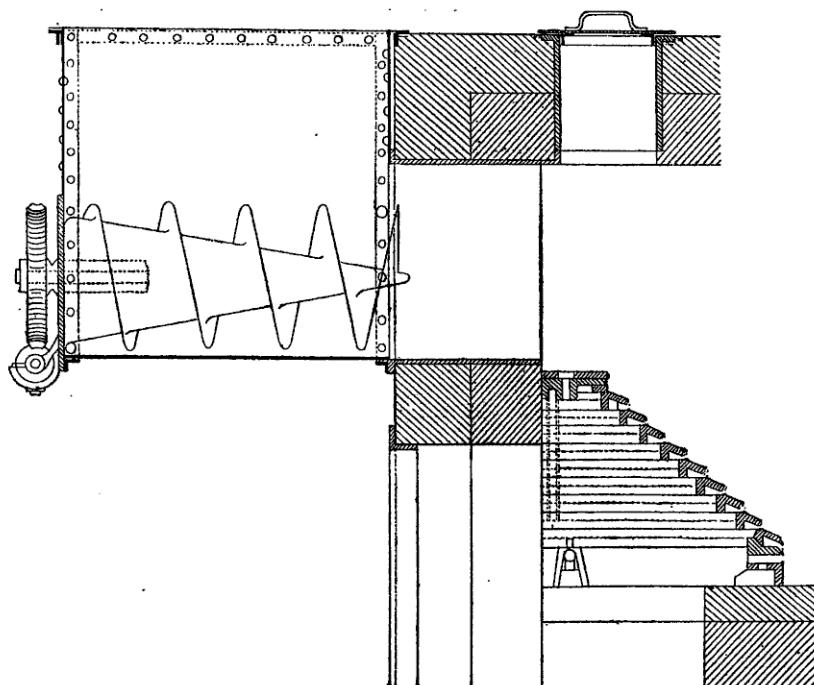


FIG. 1

Les procédés que nous avons imaginés pour réaliser la combustion méthodique se composent donc de deux éléments : la grille-pavillon et l'hélice à auget croissant.

Nous allons examiner quelques types d'installations ce qui nous permettra de montrer le détail de nos procédés, et en faire ressortir les avantages. Examinons d'abord le type que nous avons créé pour brûler les matières humides telles que la tannée humide 68 % d'humidité, les copeaux de fabriques d'extraits 62 % la sciure humide, la bagasse 55, la cossette 60 % résidus des sucreries de canne.

Prenons l'exemple de l'installation de MM. Luc et Patin, fabricants d'extraits de chêne à Nancy, fig. 2 et 3. Il s'agit de brûler des copeaux à 62 % d'humidité.

FIG. 2

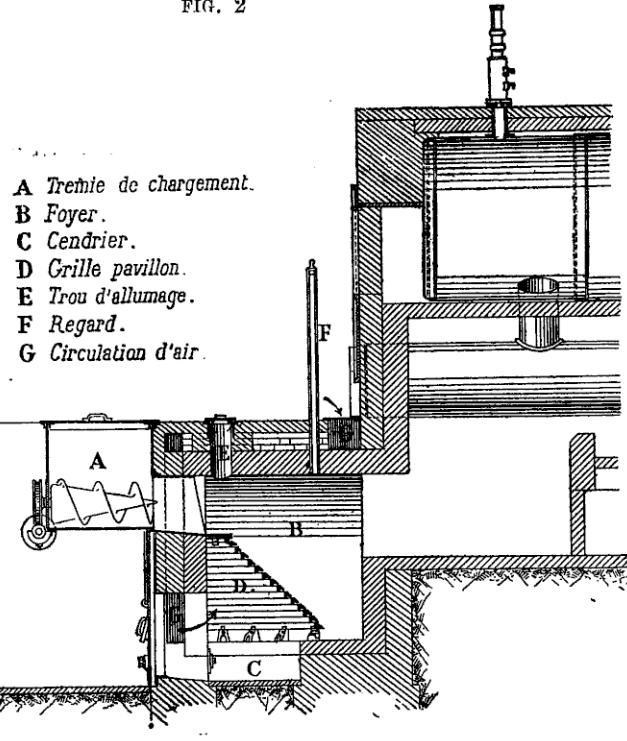
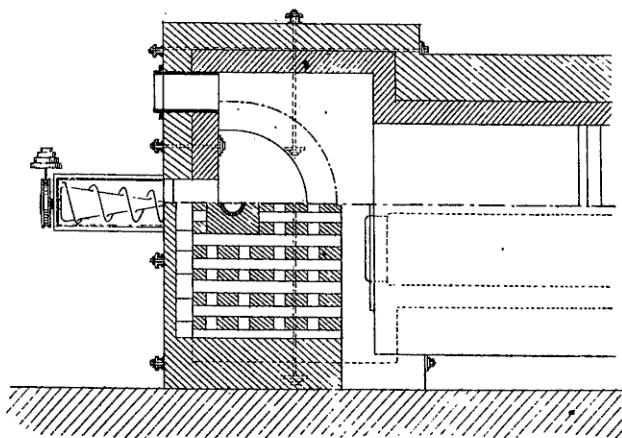


FIG. 3



Le foyer se trouve situé dans un fourneau voûté, placé devant la chaudière. Quand il s'agit de combustibles humides, je préfère cette disposition à la combi-

aison ordinaire qui consiste à placer la grille sous le générateur. En effet ces matières donnent des gaz chargés d'humidité, la température du foyer est peu élevée, et j'aime mieux éloigner de l'endroit où se fait la combinaison des gaz une surface de refroidissement telle que le corps froid de la chaudière.

D'ailleurs on diminue les pertes de chaleur par les parois du fourneau en établissant autour de celui-ci une circulation de l'air qui se rend au cendrier. La voûte est percée de deux orifices, l'un est muni d'un tube de faible diamètre, et sert de regard permettant d'examiner le feu, l'autre est le trou d'allumage, il sert à charger le combustible à la main en cas de besoin, par exemple, le matin quand le moteur de l'usine qui actionne le mécanisme de chargement n'est pas encore en mouvement.

La matière à brûler est versée dans la trémie de chargement. L'hélice à auget croissant l'amène au sommet de la grille-pavillon, elle se dessèche, s'échauffe s'enflamme, descend sur la pente du cône, tout en formant une couche mince, au fur et à mesure que celle qui est au-dessous se consume ; finalement elle arrive sur la sole horizontale où la combustion s'achève et où les cendres s'accumulent.

On les retire facilement soit par les portes latérales (portes de nettoyage) soit en introduisant un court crochet dans l'intervalle ménagé entre le pavillon et la grille horizontale, et en les faisant tomber dans le cendrier.

La marche du foyer est tout à fait régulière. Des chances de coup de feu par suite des explosions sont évitées. Le chauffeur suivant les besoins de l'usine règle la quantité de combustible introduite dans le foyer (généralement l'hélice est commandée par des cônes de courroie). Il devient facile de régler exactement le tirage, à chaque vitesse de l'hélice correspond à une ouverture du registre déterminée une fois pour toutes. Dans les foyers ordinaires, avec des charges alternatives le tirage ne peut être régulier puisque l'état du feu se modifie à chaque charge, il faudrait également modifier le tirage, ce qui est difficilement réalisable.

Les avantages de l'appareil sont les suivants :

- 1° Élévation au rang de combustibles industriels des matières pauvres.
- 2° Meilleure combustion.
- 3° Régularité de la marche, ce qui évite les chances de coups de feu, et permet de régler le tirage.
- 4° Suppression des rentrées d'air.
- 5° Simplification du rôle du chauffeur.
- 6° Fumivoreté complète même pour les combustibles les plus fumeux.

Pour donner une idée des résultats obtenus je donnerai quelques chiffres de vaporisation. Nous avons fait des essais chez Madame V^e Gondolo, fabrique d'extraits à Nantes, sur la même chaudière avec la grille ordinaire puis avec notre appareil ; à la même allure la grille a vaporisé 240 grammes par

kilogramme de copeaux de châtaignier à 66 % d'humidité tandis que notre foyer a dépassé 1300 grammes. M^{me} Gondolo possède 6 générateurs représentant 500 mètres carrés, munis de nos appareils.

MM. Luc et Patin, fabricants d'extraits à Nancy, chez lesquels nous avons 7 foyers, chauffant 500 mètres carrés de chaudières, nous écrivaient à la date du 14 février 1886, que l'économie réalisée par mes appareils était de 18 tonnes de houille par jour. En effet, on comptait une dépense de une tonne de charbon pour une tonne d'extrait à 25 % Beaumé; l'usine fabrique 18 tonnes par jour, et l'emploi de la houille a été supprimé.

Un kilogramme de tannée, essorée à 55 % d'humidité, ne vaporise guère, dans les appareils ordinaires, que 450 grammes tandis que dans des essais faits par M. Compère, ingénieur directeur de l'Association parisienne des propriétaires d'appareils à vapeur, sur nos appareils ont donné 1700 grammes.

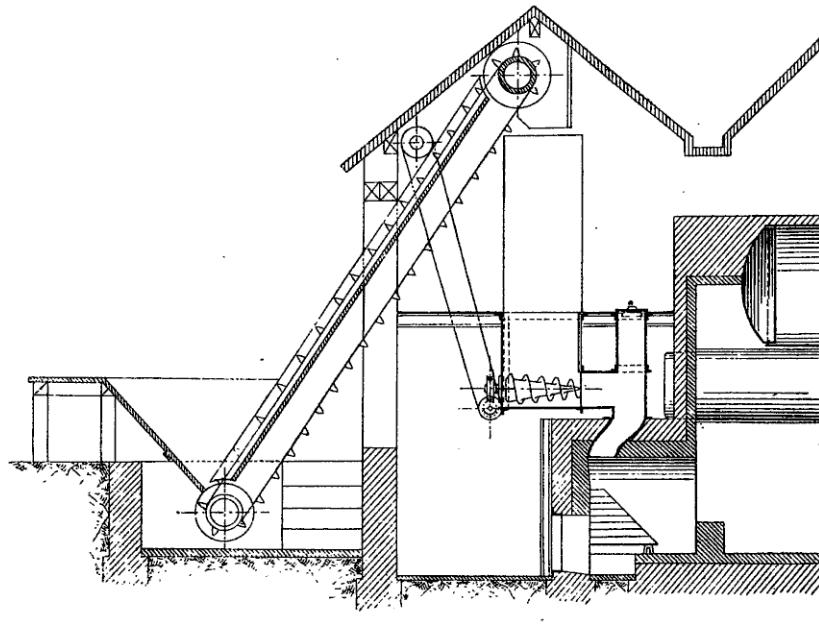


FIG. 4

Depuis plusieurs années, nos appareils se sont répandus pour utiliser, au chauffage des générateurs, la bagasse, contenant 55 % d'humidité. L'application des procédés de la diffusion à la sucrerie de canne était arrêtée par la difficulté de brûler le résidu, la cossette contenant de 60 à 65 % d'humidité; Les premiers appareils à combustion méthodique, furent montés par la Compagnie

de Fives-Lille, à l'usine de Vono-Pringo (Java), (campagne de 1888); Leur succès eut un énorme retentissement; Depuis, une vingtaine d'appareils, chauffant 22 000 mètres carrés de chaudières, nous ont été commandés.

Nous fûmes amenés à traiter les combustibles encombrants facilement inflammables, tels que les copeaux de raboteuse, les déchets de teillage de lin, du chanvre, de la ramie. Nous combinâmes une disposition qui mettait à l'abri du rayonnement du feu, et par suite à l'abri de l'incendie, la provision de matière emmagasinée dans la trémie.

L'installation la plus importante que nous ayons faite sur les copeaux secs, est celle de MM. Trystram et C^{ie}, à Dunkerque. Le combustible, pris dans une cour, par une chaîne sans fin, est versé dans les trémies; l'hélice fait écouler les copeaux de raboteuse en une sorte de pluie continue sur la grille-pavillon (fig. 4).

A la date du 15 mai 1889, MM. Trystram et C^{ie} m'écrivaient que les trois appareils, montés sur 3 générateurs, ensemble 200 mètres carrés, leur faisaient brûler moins de copeaux, supprimaient la fumée, dont se plaignaient autrefois les voisins, et réduisaient à moitié les frais de chauffage (deux chauffeurs au lieu de quatre).

Le tableau suivant donne les résultats d'essais de vaporisations, ayant, pour ainsi dire un caractère officiel :

Ces essais ont été dirigés par les ingénieurs des associations de propriétaires d'appareils à vapeur. Ils indiquent qu'avec des lignieux, variant de 13 à 62 % d'humidité, la vaporisation par kilogramme de matière a varié de 3300 à 1 450 grammes.

Si on déduit du calorique du combustible la chaleur perdue par son humidité, on trouve par les divers essais cités plus haut, que le rendement en vapeur a été voisin de 85 %, tandis que la houille, dans les meilleures conditions, ne dépasse guère 75 %.

Les procédés de la combustion méthodique, qui donnaient de si beaux résultats avec les mauvais combustibles, devaient s'appliquer aux combustibles riches, comme la houille; mais deux inconvénients se présentaient :

- 1^o La grille ne résistait pas à la haute température;
- 2^o La houille collait aux barreaux dont le nettoyage était difficile.

Nous avons écarté ces difficultés en réalisant une circulation d'eau dans la grille; la houille ne colle plus sur les surfaces refroidies; il n'y a plus par suite de difficulté de nettoyage, plus de détérioration. Nous avons appelé cette disposition : *grille à bassins étagés*.

La grille a la même forme que la grille-pavillon, mais chaque barreau porte une nervure plongeant dans une cuvette; l'eau, introduite au bassin du sommet

ESSAIS DE VAPORISATION FAITS AVEC LE FOYER GODILLON

DATES des ESSAIS	INGENIEURS AYANT DIRIGÉ LES ESSAIS	NATURE du COMBUSTIBLE expérimenté	CHAUDIÈRE EXPÉRIMENTÉE			POIDS DE VAPEUR produit rapporté à 1 kil. de com- bustible sec		
			HUMIDITÉ 0/0 CONTENUE après séchage à 110 degrés	TYPE	Surface de chauffe totale			
25 avril 1885	M. Compère, Ingénieur de l'Association parisienne des propriétaires d'appareils à vapeur.	Scieure et copeaux provenant des ateliers de menuiserie	13,36	A bouilleurs 2 ré-tailage	82m ²	5k	3,200	3,610
14 mai 1885	M. Compère, Ingénieur de l'Association parisienne des propriétaires d'appareils à vapeur.	Tannée essorée	55	Semi-tubulaire.	45m ²	5k	1,785	3,970
3 et 4 juin 1885	M. Walther-Meunier, Ingénieur de l'Association alsacienne des propriétaires d'appareils à vapeur	Copeaux humides d'une fabrique d'extrait	62,30	Semi-tubulaire.	100m ²	5 ^k ,7	1,450	3,840
26 février 1886	M. Compère, Ingénieur de l'Association parisienne des propriétaires d'appareils à vapeur.	Déchets de paille de lin provenant du tailage	29,50	Abouilleurs 2 ré-chapeurs.	82m ²	5 ^k ,660	2,700	3,820
16 octobre 1885	M. Vinçotte, Ingénieur de l'Association belge des propriétaires d'appareils à vapeur.	Scieure de bois de sainpin	33,75	Multi-tubulaire.	213m ²	5 ^k ,56	2,541	3,83
20 mai 1886	M. Davelshauvers-Dery, professeur à l'Université de Liège.	Déchets de paille de ramie provenant de la décarication	10,59	A bouilleurs 2 ré-chauffeurs.	82m ²	4 ^k ,42	3,300	3,690

descend en cascade, de cuvette en cuvette, pour tomber finalement dans le cendrier, figure 5.

Cette grille permet de brûler la houille, le coke, l'anthracite, le lignite, la tourbe, même à l'état de poussière.

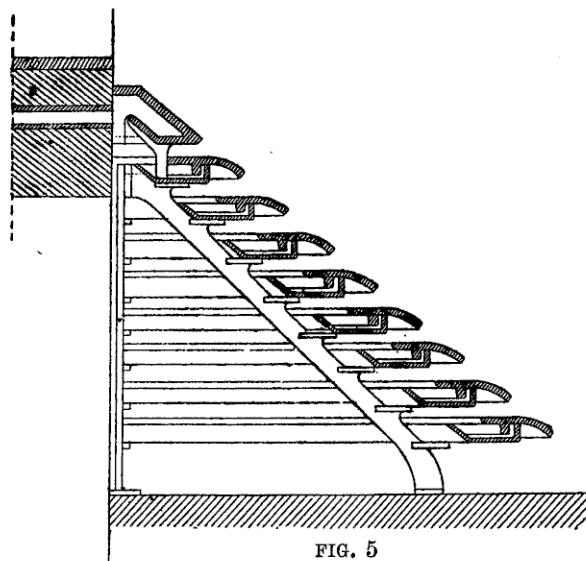


FIG. 5

Un premier appareil, monté en 1888, chez MM. E. Coëz et Cie, à Saint-Denis, a donné une économie de 30 %; moitié environ de cette économie obtenue par un meilleur rendement; l'autre moitié par l'emploi du combustible meilleur marché, des fines au lieu de tout venant.

Le tableau ci-après donne les résultats des essais faits par M. Compère, ingénieur directeur de l'Association parisienne des propriétaires d'appareils à vapeur; est extrait du dernier bulletin.

Cette chaudière, avec la grille ordinaire, a vaporisé par kilogramme de tout venant 6 kilg. 09, conduite par le chauffeur de l'usine; 6 kilg. 70 conduite par le maître chauffeur de l'Association parisienne. Cette même chaudière, munie de notre grille, à la même allure : 15 kilogrammes de vapeur par mètre et par heure, a vaporisé 8 kilg. 500 par kilogramme de fines (valant 2 francs de moins la tonne).

Cette expérience prouve la supériorité du combustible menu; on est donc dans une très mauvaise voie en recherchant le combustible à l'état de gros fragments; les matières menues sont bien plus aptes à donner une bonne combustion. D'un autre côté, avec nos appareils, le tirage de la cheminée à l'usine a toujours suffi

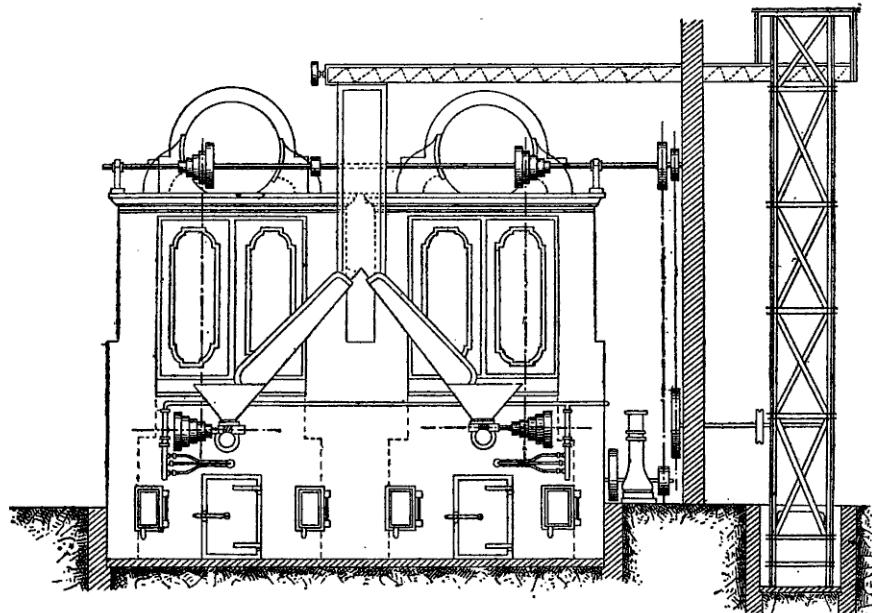


FIG. 6

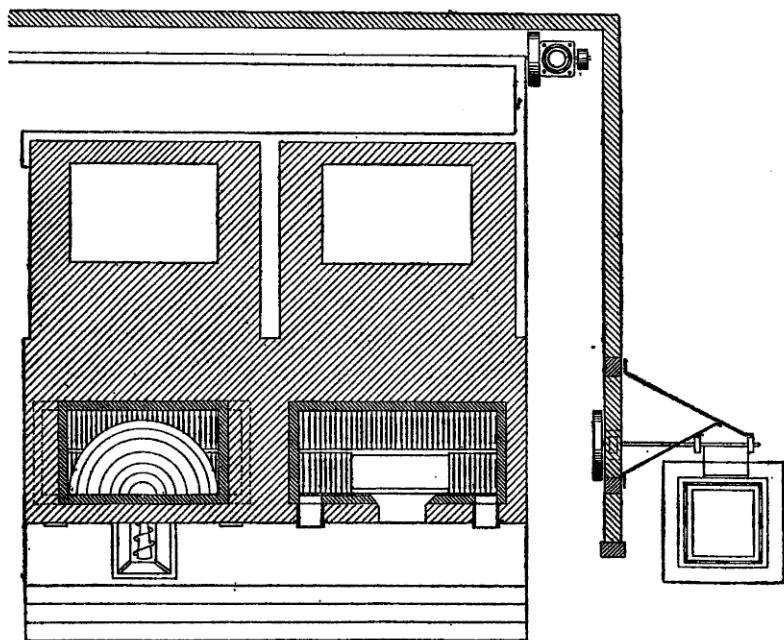


FIG. 7

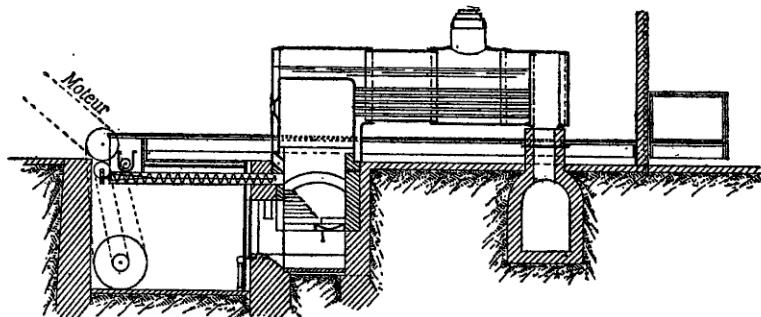


FIG. 8

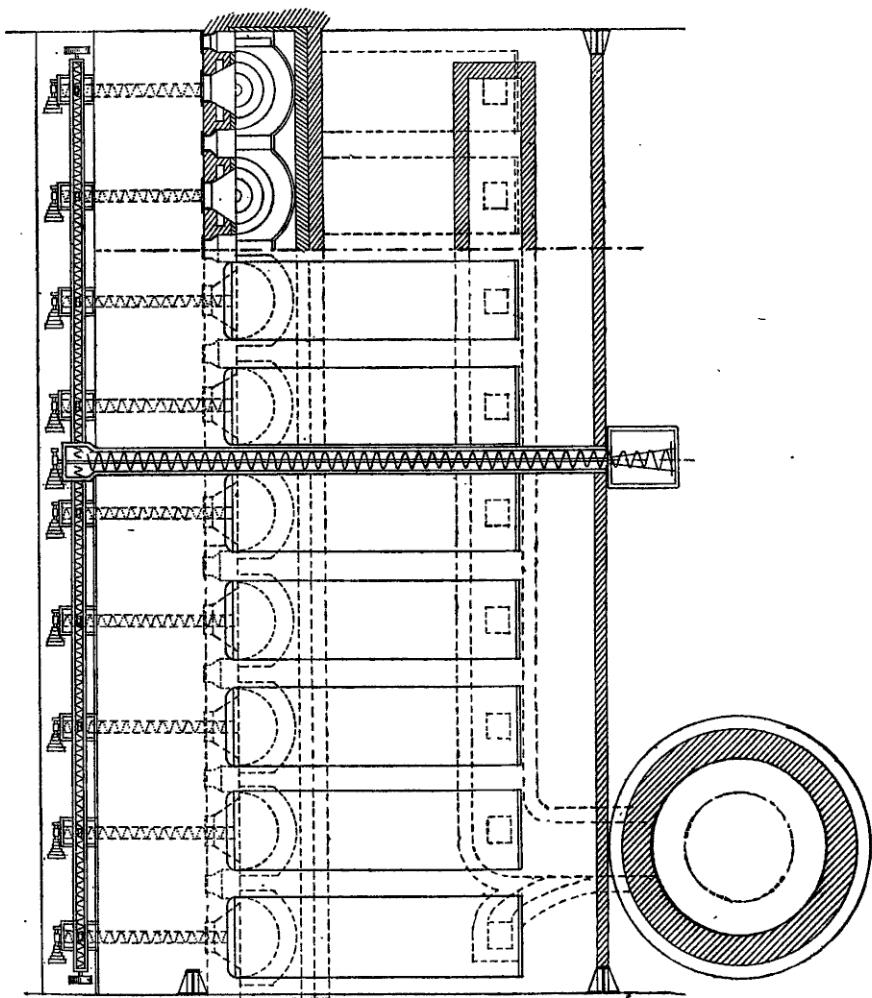


FIG. 9

pour obtenir une allure vive, même avec les fines de coke, ce qui prouve que les combustibles pulvérulents dans des appareils où ils sont brûlés en couche mince n'ont pas besoin de vent soufflé.

DÉSIGNATIONS	GRILLE ORDINAIRE		GRILLE GODILLOT 4 décembre Chaudière isolée par un joint plein
	11 mai 1888 chauffage habituel	15 nov. 1889 conduit par l'Inspecteur de l'Association	
Eau vaporisée ramenée à 5 kil. et à 0° par kil. de charbon brut	6 ^k ,09	6 ^k ,70	8 ^k ,58
Eau vaporisée ramenée à 5 kil. et à 0° par kil. de charbon pur.	6,62	7,22	9,51
Eau vaporisée ramenée à 5 kil et à 0° par heure et par mètre carré de surface de chauffe	15,45	13,70	16,50
Eau vaporisée ramenée à 5 kil. et à 0° par heure et par mètre carré de plan d'eau	100	88,18	103,29
Eau vaporisée ramenée à 5 kil. et à 0° par heure et par mètre cube de chambre de vapeur	236	207,92	243,53
Tirage à la base de la cheminée . . .	28 ^m /m	28 ^m /m	28 ^m /m
Tirage seulement adopté d'après le degré de fermeture du registre	3 »	3 »	3 »

Avec des poussières de houille, la même chaudière (à bouilleurs) a été conduite à des allures variables de 8 kilogrammes à 24 kilogrammes de vapeur par mètre carré par heure, donnant toujours un rendement élevé.

A l'Exposition, nous avions 13 foyers à bassins étagés en marche, activant 13 générateurs, représentant une vaporisation de 18 000 kilogrammes par heure :

1^o Station Steinlen (anciens ateliers Ducommum), 2 chaudières multitungliaires de MM. Daydé et Pillé, système Lagosse et Bouché, ayant chacune une surface de 120 mètres carrés (fig. 6 et 7).

La grille à bassins étagés est placée directement sous la chaudière ; un petit monte-chARGE prend le combustible dans la cour et le porte dans une trémie placée en haut de la grille, de là il est distribué mécaniquement à chacun des foyers.

2^o Installation Roser. — Pour respecter les façades, les foyers sont placés en sous-sol ; une hélice au niveau du sol prend les fines dans la cour et les conduit à chaque foyer (deux générateurs, surface 170 mètres carrés).

3^o Station Gramme. — 9 chaudières types locomotives de MM. Davey-Paxman, de Colchester, surface totale 600 mètres carrés.

Cette disposition était analogue à la précédente ; mais le service était extrê-

mément dur : il s'agissait de conduire les fontaines lumineuses, les chaudières étaient très chargées. D'un autre côté, les arrêts brusques en pleine marche, motivés par les entractes de vingt minutes, compliquaient singulièrement la difficulté (fig. 8 et 9)

En résumé, nous avons réussi à appliquer les procédés de la combustion méthodique, d'abord aux combustibles les plus pauvres, puis aux matières encombrantes facilement inflammables, et enfin aux matières riches. Avec tous, nous obtenons un rendement meilleur, une simplification du rôle du chauffeur, et une fumivoreté complète.

Générateur à production de vapeur instantanée

(Système Serpollet)

PAR

M. G. LESOURD

Bien que le générateur *Serpollet* ait déjà fait l'objet de plusieurs rapports devant les Sociétés scientifiques, nous avons pensé qu'il n'était pas sans intérêt de rappeler les traits caractéristiques de cette invention qui constitue une véritable innovation dans la production des petites forces et se rattache ainsi directement à l'étude des perfectionnements apportés aux chaudières à petits éléments que le Congrès a mis à son ordre du jour.

Le générateur *Serpollet* appartient à la catégorie des générateurs dits à production de vapeur instantanée, et semble être l'une des solutions les plus heureuses de ce problème tant cherché, et jusqu'à ce jour si imparfaitement résolu.

Il repose sur deux principes invariablement liés l'un à l'autre et pouvant se résumer en ces deux lignes :

Vaporiser l'eau dans un espace aussi faible que possible.

Entourer cet espace d'une masse métallique relativement considérable.

La première condition empêche tout phénomène de caléfaction de se produire par l'écrasement et la vaporisation successive des gouttelettes globulaires au fur et à mesure de leur formation.

La deuxième permet d'emmagasiner autour de la *surface vaporisante* la quantité de chaleur nécessaire pour faire face à toute variation de température provenant d'une augmentation ou d'une diminution même subite de la quantité d'eau à vaporiser.

La solution de ce double problème qui semblait le mieux remplir les conditions voulues consistait à prendre un tube métallique de forte épaisseur et à le laminer à chaud de façon à rapprocher l'une de l'autre les parois internes, tout en évitant bien entendu leur soudure en un point quelconque.

O'est dans cet espace de quelques dixièmes de millimètre seulement d'épais-

seur que se vaporisera l'eau ; et la masse métallique nécessaire sera fournie par la forte épaisseur du tube.

Un tube ainsi aplati, d'une longueur de deux mètres environ, ayant 0^m,105 de large et 0^m,022 d'épaisseur totale, disposé à ses deux extrémités pour recevoir des raccords, forme à lui seul une chaudière d'une force moyenne de 1 cheval.

Son poids n'est que de 33 kilogrammes.

Sa forme peut être aussi ramassée qu'on le désire par un enroulement convenable, de façon à diminuer autant que possible les dimensions de l'enveloppe qui lui servira de foyer.

La surface intérieure que nous nommerons *surface vaporisante* est d'environ 24 décimètres carrés.

La surface extérieure ou *surface de chauffe* est de 36 décimètres carrés. Pour transformer ce tube en appareil de production continue de vapeur, il suffit de le placer dans un foyer disposé le plus convenablement possible, de le chauffer vers 200° et d'injecter à une de ses extrémités de l'eau à l'aide d'une pompe aspirante et foulante de très faibles dimensions. Cette eau est aussitôt vaporisée au contact des parois internes, traverse le tube avec une extrême rapidité, et ressort à l'autre extrémité à l'état de vapeur plus ou moins sèche, et dont l'état dépend de la température, de la quantité d'eau injectée, et des dimensions relatives du tube.

Pour combiner cet appareil avec un moteur à vapeur d'un système d'ailleurs quelconque, il suffit d'établir une commande de la pompe d'injection par excentrique ou par tout autre moyen, et de conduire la vapeur produite dans la boîte de distribution.

On obtient ainsi un groupement intime de deux appareils, les rendant solidaires l'un de l'autre, à tel point que le fonctionnement de la chaudière dépend exclusivement de celui de la pompe d'injection et par conséquent de la machine et que le fonctionnement de la machine dépend des conditions dans lesquelles se trouve la chaudière.

Aussi a-t-il fallu imaginer un système de régulateur réciproque pouvant, lorsque la vitesse de la machine augmente, diminuer la quantité d'eau injectée, et par conséquent la vapeur produite, et pouvant au contraire, lorsque la vitesse de la machine tend à diminuer, agir en sens inverse.

Ces régulateurs se rapportent à deux types : dans l'un le régulateur à boules du moteur est relié par un système de leviers à la clef d'un robinet de décharge placé sur la conduite de refoulement de la pompe, et qui permet de renvoyer à la bâche d'injection tout ou partie de l'eau puisée.

Dans l'autre, le régulateur à boules agit par l'intermédiaire d'une coulisse sur la course même du piston d'injection.

Il est facile de voir que dans les deux cas, une augmentation de vitesse amène une diminution d'injection d'eau, et vice versa.

Ces modes de régularisation qui, au premier abord, pourraient inspirer quelques doutes sur le bon fonctionnement d'un semblable appareil, ont donné dans la pratique les résultats les plus concluants, et dont une des preuves les plus convaincantes est la fixité absolue de la lumière dans les applications à l'éclairage électrique par des lampes à incandescence.

Etant admis en principe les faits que nous venons de relater et qui ont été consacrés par une longue expérience, nous passerons rapidement en revue les particularités les plus frappantes d'une installation formée d'un générateur *Serpolle* et d'un moteur à vapeur de petite force.

L'eau d'alimentation est contenue dans un récipient quelconque, *aspirée, utilisée et vaporisée au fur et à mesure des besoins*. La quantité employée est d'environ 13 litres par cheval et par heure.

Pour mettre le moteur en marche, il suffit, le tube étant à température voulue, d'injecter à l'aide d'un levier à main qui peut actionner le piston plongeur de la pompe d'injection quelques gouttes d'eau qui, en se vaporisant, viennent agir sur le piston moteur et le mettre en mouvement. A partir de ce moment, le moteur alimente lui-même sa chaudière, suivant les besoins.

Veut-on arrêter lentement, on ferme un robinet placé sur l'aspiration d'eau, la machine vaporise ce qui reste dans le tube de refoulement et s'arrête.

Veut-on arrêter brusquement, on ouvre un robinet faisant communiquer le tube de refoulement avec l'extérieur. Les quelques centimètres cubes d'eau que contient la chaudière s'échappent à l'extérieur, mêlés à la vapeur qui remplissait le tube, et l'arrêt brusque de la machine se produit.

Si on oublie d'alimenter, cette faute ne sera suivie que d'un seul effet, l'arrêt progressif du moteur.

De ce côté, tout risque d'accident est donc entièrement supprimé. Et dès lors, le seul qui puisse se produire, c'est-à-dire l'explosion de la chaudière, ou mieux la rupture d'un tube par suite d'une trop haute température et d'une pression trop forte, n'est jamais accompagné d'aucune projection, grâce au volume extrêmement faible de vapeur qui s'y trouve renfermé, et qui ne dépasse pas quelques centimètres cubes.

Les tubes peuvent être éprouvés à 100 atmosphères, et en marche, leur rupture accidentelle se borne à une fuite de vapeur du reste peu importante, suivie d'un arrêt progressif du moteur.

Les incrustations ne peuvent se produire dans le tube lui-même à cause de la vitesse de la vapeur qui le traverse, et du manque d'espace pour s'y déposer. Les matières salines que peuvent contenir l'eau sont pulvérisées et mêlées à la vapeur ; les circonstances mêmes dans lesquelles elles se sont produites les empêchent d'avoir une action nuisible sur les organes du moteur, où elles ne s'amassent du reste jamais, étant entraînées en majeure partie par l'échappement, avant d'avoir pu se déposer.

Cependant, dans le cas d'eaux, très chargées, il pourrait se former des dépôts dont la superposition pourrait devenir nuisible. On remédie à cet inconvénient par un lavage périodique du tube, à l'eau légèrement acidulée, opération pour laquelle on a prévu un dispositif spécial.

Après avoir essayé successivement de tubes en fer et de tubes en cuivre, on a abandonné définitivement ces derniers, qui n'offraient pas à haute température une résistance suffisante, et subissaient des diminutions de poids considérables. Le meilleur résultat paraît être donné aujourd'hui par des tubes d'acier de quelques millimètres d'épaisseur, laminés et noyés dans la fonte et qui remplissent avantageusement les deux conditions citées plus haut. Ce n'est cependant peut-être pas le dernier mot de la fabrication de ces organes qui constituent, on le comprend sans peine, le point le plus essentiel et le plus délicat de la question.

Pour éviter l'influence néfaste d'une température trop élevée sur le tube, dans les moments où il ne travaille pas, on a dû faire évacuer les gaz chauds provenant du foyer par un conduit latéral, à l'aide d'un registre qui s'ouvre *automatiquement* chaque fois qu'on arrête le moteur. Enfin, le foyer lui-même a donné lieu et donne encore lieu à des études minutieuses, car ses faibles dimensions elles-mêmes rendent plus difficile une bonne utilisation du combustible.

On a pu se rendre compte, par ce rapide exposé, que les appareils de sûreté exigés pour les chaudières ordinaires deviennent ici complètement inutiles, et les appareils *Serpollet* en ont été exemptés, à l'exception d'une soupape de sûreté sur le refoulement de la pompe au cylindre, par une décision spéciale. Le timbrage des tubes n'est qu'une formalité illusoire, étant donnée l'innocuité absolue d'une rupture.

On pouvait voir, à l'Exposition universelle, diverses applications des plus usuelles du générateur *Serpollet*:

Une installation électrique avec moteur de un cheval actionnant une dynamo qui alimentait seize lampes Gérard à incandescence de seize bougies chacune ;

Un générateur formé de deux tubes élémentaires reliés en tension, actionnant une pompe rotative. Dépense : 4 kilogrammes de houille par cheval et par heure ;

Un générateur de trois chevaux actionnant une machine-pilon destinée à une embarcation de plaisance. Dépense de houille : 8 kilogrammes à l'heure. Dépense de vapeur : 35 kilogrammes environ ;

Enfin, une application d'un générateur de deux chevaux à une yole de plaisance. L'appareil a donné dans ce cas des résultats très satisfaisants et a prouvé, dans de nombreuses expériences, la surproduction considérable dont il est capable, et la perfection absolue du mode de régularisation.

L'application à la traction des véhicules légers est, de toutes, celle qui a fait le

plus de progrès, et plusieurs types de tricycles et voitures à vapeur ont été construits qui ont donné les résultats les plus satisfaisants.

Le générateur d'un cheval à un cheval et demi, formé de deux tubes accouplés en tension, est enfermé dans une enveloppe métallique formant foyer et relégué à l'arrière. Le moteur est sous le véhicule ; la caisse à eau sous le siège ; l'alimentation de combustible est automatique.

L'allure se règle d'une façon très ingénieuse et très simple par la rotation l'une des poignées directrices, rotation qui ouvre ou ferme plus ou moins le robinet d'évacuation d'eau dont il a été question dans le premier mode de régularisation.

L'arrêt d'urgence en moins de deux mètres est obtenu par l'ouverture en grand de ce robinet, accompagnée de l'application d'un frein funiculaire dont la commande est placée sous le pied du conducteur.

La vitesse moyenne en palier est de 20 à 25 kilomètres à l'heure, et en augmentant la vaporisation, par l'action combinée du levier à main, on peut obtenir des surproductions considérables et assez durables pour gravir des pentes atteignant jusqu'à 15 centimètres par mètre et plus. C'est du reste une particularité de l'appareil, dépendant de sa nature même, de pouvoir se prêter, aussi bien dans les machines fixes que dans les appareils de traction, à cette surproduction grâce à laquelle on a pu arriver quelquefois à décupler la puissance de vaporisation pendant un temps très notable.

On peut noter aussi comme particularité essentielle ce fait que la pression de la vapeur n'est pas limitée à un maximum infranchissable comme dans les chaudières ordinaires.

La pression par unité de surface sur le piston du cylindre à vapeur peut toujours s'élever au niveau de la résistance à vaincre, et suivant la force de la soupape placée sur le refoulement d'eau, elle peut atteindre telle valeur qu'on désire sans qu'il y ait aucun risque à courir du côté du générateur.

Dans les voitures à vapeur pouvant contenir trois personnes, la réserve d'eau est de 40 litres ; celle de charbon de 60 kilogrammes. On use environ 18 litres d'eau à l'heure et 8 kilogrammes de charbon, ce dernier chiffre un peu élevé étant dû à une activité de la combustion provenant de la rapidité de l'allure. On peut donc, ainsi que cela a été fait maintes fois, et un récent voyage entre Paris et Lyon, l'a confirmé, franchir 60 kilomètres sans renouveler sa provision d'eau et près de 200 kilomètres sans renouveler celle de charbon.

Telles sont, jusqu'ici, les applications principales qui ont été faites du générateur *Serpolle*, et qui se poursuivent sans relâche.

Il semble, par son faible poids et son petit volume, la facilité extrême de sa surveillance et de son entretien, et par dessus tout par la sécurité absolue que présente son emploi, devoir tenir une large place dans la production des petites forces.

En outre de ses applications multiples aux petits ateliers, aux usines, aux

moulins, aux pompes élévatrices, etc., etc., il semble devoir donner la solution réellement pratique de l'éclairage électrique à domicile.

Nous n'avons pas voulu nous arrêter ici sur les divers perfectionnements qui ont été apportés au foyer, au régulateur et aux autres organes de l'appareil, notre but ayant été d'appeler l'attention du Congrès sur les particularités principales qui le distinguent essentiellement des autres, et persuadés qu'il occupera avant peu, au moins, dans les appareils de production de petites forces, la place qui lui convient.

CHAUDIÈRE A CIRCULATION D'EAU

Système A. Lagrafel & J. d'Allest

La transformation capitale qui commence à s'effectuer dans les machines marines et qui consiste à employer la vapeur à des pressions de 12 à 15 kilogrammes, se détendant successivement dans trois ou quatre cylindres, nécessite le remplacement des chaudières cylindriques, à foyer intérieur, actuellement en usage.

Ces dernières, en effet, vu leurs grandes dimensions et les efforts énormes qu'elles ont à supporter, ne peuvent être armées de façon à résister à des pressions aussi élevées ; elles sont, en outre, extrêmement lourdes, ce qui est un inconvénient très grave lorsqu'on recherche la vitesse et que, pour l'atteindre, il faut, à tout prix, obtenir des appareils moteurs extrêmement légers.

Ces considérations ont conduit les inventeurs à la création des chaudières dites *multitubulaires*, composées d'un faisceau de tubes contenant l'eau à vaporiser et munies d'une grille placée au-dessous.

Mais, on sait que, dans ce genre de chaudières, l'utilisation du combustible est très mauvaise ; les gaz produits sur la grille, s'élèvent verticalement et se mélangent mal avec l'air ; si on soumet à l'analyse des prises d'échantillons effectués dans cette partie, on trouve des veines d'air pur cheminant à côté de veines gazeuses composées de gaz combustibles non brûlés ; l'emploi des appareils de brassage, à jet de vapeur ou d'air comprimé, a amélioré un peu ces conditions sans cependant permettre d'arriver à la combustion complète.

Ces chaudières ont, de plus, l'inconvénient d'offrir de très grandes surfaces froides aux gaz carbonés dès qu'ils se dégagent de la grille, ce qui entraîne les phénomènes de dissociation constatés par les expériences de M. Scheurer-Kestner, et occasionne une très grande perte de chaleur, le refroidissement brusque empêchant les éléments dissociés de se recombiner.

Enfin, dans ces chaudières, les produits gazeux circulant verticalement se dépoient mal de la chaleur qu'ils contiennent et en emportent une grande quantité dans la cheminée.

Par contre, on sait, qu'au point de vue de la combustion, la chaudière marine ordinaire, à boîte à feu et à retour de flamme, est parfaite ; le foyer ne présente pas de grandes surfaces refroidissantes, la présence de l'autel et de la boîte à feu

assurent le mélange des gaz en forçant la flamme à se replier sur elle-même, et le faisceau tubulaire en retour吸orbe la chaleur totale contenue dans les produits de la combustion, après que celle-ci a été totalement effectuée ; on ne peut reprocher à ces chaudières qu'une mauvaise circulation de l'eau qui y est contenue, les poids exagérés qu'elles atteignent et l'impossibilité dans laquelle on se trouve de les approprier à l'emploi des hautes pressions.

Ces diverses considérations nous ont conduits à étudier et à construire le type de chaudières représenté figures 1 et 2 de la planche 5-6.

I -- DESCRIPTION DES CHAUDIÈRES

Chaque corps de notre chaudière se compose d'un faisceau tubulaire, à courant d'eau intérieur, mettant en communication deux boîtes planes prismatiques, A et B, parfaitement entretoisées, formant les faces avant et arrière de la chaudière.

Ces boîtes sont, en outre, mises en communication par un cylindre C, horizontal ou incliné, de petit diamètre, placé à leur partie supérieure, et dans lequel se trouvent le plan du niveau d'eau et le réservoir de vapeur.

Les tubes, disposés par rangées verticales rectilignes, sont inclinés sur l'horizon d'une quantité suffisante pour que l'eau et la vapeur produite circulent librement à l'intérieur.

Cette circulation, qui est très active, se propage également dans les boîtes prismatiques A et B ainsi que dans le cylindre C, formant réservoir de vapeur

Les tubes sont assemblés sur les plaques sans être matés ni rivés, au moyen d'un mandrin à roulettes.

Les faces avant et arrière de la chaudière faisant partie des boîtes prismatiques A et B, portent, en face de chaque tube, une ouverture circulaire, fermée par un bouchon autoclave de même forme, tenu au moyen d'une traverse et d'une tige à écrou. Le joint se fait tout simplement à l'aide d'un anneau en cuivre rouge recuit de 2 millimètres, de diamètre, ou d'une rondelle d'amiante, ou d'un boudin de caoutchouc.

Ces ouvertures sont assez grandes pour permettre de mettre en place, de démonter et de nettoyer les tubes.

Cet ensemble forme un tout rigide, se fixant bien sur un navire et ne pouvant pas se disloquer par les roulis.

La grille D est placée au-dessous de la première rangée de tubes; celle-ci, recouverte de grilles ayant la forme indiquée sur le dessin, forme ciel de foyer; les gaz de la combustion produits sur la grille, passent par-dessus un autel F pour arriver dans une chambre de combustion G ménagée entre les tubes; ils se renversent ensuite sur eux-mêmes et font retour à travers le faisceau tubulaire.

dont la dernière rangée est également recouverte de briques, pour aboutir enfin à une boîte à fumée I, et, de là, à la cheminée K, après avoir chauffé la partie inférieure du réservoir C.

L'intervalle entre deux tubes, multiplié par la longueur des tubes et par le nombre de rangées horizontales, représenté, ici, ce qui constitue, dans les chaudières marines ordinaires, la section tubulaire.

Mais il faut remarquer que les gaz, qui se trouvent à une certaine température T dans la boîte à feu, sont refroidis graduellement à mesure qu'ils traversent le faisceau tubulaire, pour arriver finalement à une certaine température t dans la boîte à fumée.

Pendant ce refroidissement les volumes diminuent dans le rapport

$$\frac{T + 273}{t + 273}$$

de leur température absolue à l'entrée et à la sortie du faisceau tubulaire.

Dans la chaudière marine ordinaire, où les gaz circulent dans les tubes, cette diminution de volume n'a d'autre conséquence que d'entraîner une diminution de vitesse depuis l'entrée jusqu'à la sortie du tube, car une fois qu'un volume de gaz a pénétré dans le tube, il est bien obligé d'en sortir par l'autre extrémité.

Mais, dans notre chaudière actuelle, cette diminution de volume aurait pour conséquence, si la section de sortie était égale à la section d'entrée, de faire suivre au gaz une marche oblique ab et le volume abZ du faisceau tubulaire ne serait pas chauffé ou le serait très imparfaitement.

Pour éviter cela, la partie supérieure de la face de sortie est masquée par un écran XY, laissant en dessous de lui la section YZ nécessaire à l'écoulement du volume de gaz refroidi à la température de sortie ; il résulte de cette disposition que les gaz chauds se répandent d'abord à la partie supérieure du faisceau tubulaire et descendent par ordre de densité au fur et à mesure de leur refroidissement, pour s'échapper par l'ouverture YZ, ce qui a pour résultat de les dépoiller complètement de leur chaleur ; les mesures des températures, effectuées dans les expériences résumées plus loin, montrent que les choses se passent bien ainsi.

En accouplant deux chaudières, comme le représente le dessin, la boîte à feu est commune, et on réalise ainsi le type appelé *double ended*, des chaudières cylindriques actuelles.

Cette disposition est très bonne au point de vue de la combustion ; le brassage des gaz ne laisse rien à désirer et elle a, de plus, l'avantage de permettre de régulariser les variations de la quantité d'air qui arrive à travers les grilles ; en effet, si on a la précaution de croiser les charges, c'est-à-dire de charger alternativement le foyer de gauche et celui de droite, voici comment les choses se passent : au moment où on charge le foyer de gauche, par exemple, la couche de charbon sur la grille se trouve à son *maximum* d'épaisseur ; l'air qui la tra-

verse pour pénétrer dans le foyer, arrive alors en moins grande abondance et c'est précisément le moment où les carbures très volatils, qui se dégagent rapidement du charbon frais, ont besoin d'un excès d'air pour être brûlés ; mais comme le foyer de droite, qui n'a été chargé que bien avant le foyer de gauche, et qui ne recevra sa nouvelle charge que dans quelques instants, se trouve, au contraire, avoir la couche *minima* de charbon sur la grille, celle-ci laisse passer un excès d'air qui, arrivant dans la boîte à feu commune, rencontre les carbures volatils provenant du foyer de gauche et les brûle.

Cette chaudière réalise donc les conditions de combustion de la chaudière marine actuelle, et c'est le meilleur éloge qu'on puisse en faire ; mais elle est bien supérieure à cette dernière au point de vue de la circulation de l'eau et se prête, sous un poids moindre et avec la plus grande facilité, à l'emploi des hautes pressions.

I. — ESSAIS DE VAPORISATION

Nous avons effectué, sur deux chaudières de ce type, un très grand nombre d'essais, sous le contrôle de M. Taton, Ingénieur de la marine à Marseille, chargé de la surveillance des travaux confiés à l'industrie, qui a adressé, sur ces appareils, au Ministère de la Marine, un rapport très étudié et des plus élogieux.

Ces essais ont été effectués d'abord à tirage naturel et ensuite à tirage forcé ; enfin une troisième série d'essais, dits comparatifs, ont été effectués sur ces mêmes chaudières, mais en les séparant complètement l'une de l'autre et en supprimant la boîte à feu et le retour de flamme, de façon à étudier l'influence de ces organes sur le rendement.

Voici le résultat des principaux de ces essais :

		CONSOMMATION de charbon par heure et par mètre carré de grille	EAU vaporisée par kilogr. de charbon	DURÉE des essais
Disposition		74 kilog.	9 lit,58	6 heures
à retour de flamme, autel et boîte à feu	Tirage naturel	75 76 100 150 200 250	9 ,23 9 ,04 9 ,45 8 ,82 8 ,89 8 ,43	» » » 7 heures » »
Suppression du retour de flamme et de la boîte à feu	Tirage forcé... Tirage naturel.	76 75 10	7 ,30 6 ,72 7 ,60	» » »

Pendant tous ces essais, le charbon a été introduit dans le foyer à intervalles réguliers et par charges pescées à l'avance ; des analyses de gaz effectuées d'heure en heure ont permis de régler à chaque instant le tirage de façon à éviter les excès d'air ou les combustions incomplètes.

II. — POIDS DES CHAUDIÈRES

Malgré la pression élevée à laquelle ces chaudières fonctionnent, 15 kilogrammes pour les chaudières exposées en 1889, elles sont extrêmement légères.

Voici, à titre d'exemple, les poids d'un appareil de ce type que nous avons actuellement en construction pour un aviso-torpilleur :

Timbre	10 kilog.
Nombre de corps.	4 »
Surface de chauffe totale.	380 m ² .
Surface de grille totale	9 m ² ,40.
Rapport de la surface de chauffe à la surface de grille.	1/40
Poids total de l'appareil y compris l'eau, les boîtes à fumée, barreaux de grille, supports, accessoires de sûreté ou autres, outils de chauffe, objets de rechange réglementaires pour la marine	44 000 k.
Poids par mètre carré de surface de chauffe . . .	115 k.
Id. id. de grille. . . .	4 680 k.
Vaporisation minima par heure avec une combustion de 250 kilog. par mètre carré de grille . .	18 800 k.
Poids de chaudière par kilogramme de vapeur. .	2 k. 34

NOTE

SUR

L'emploi de l'eau de mer comme supplément

DANS LES

Chaudières marines alimentant des machines à triple expansion

PAR

D. STAPFER

Lorsqu'on a adopté, il y a vingt ans, les machines compound dans la navigation, et qu'on a dû éléver la pression des chaudières à 4, 5 ou 6 atmosphères, on a eu beaucoup de peine à résoudre la question de l'alimentation des chaudières marines.

Les premières chaudières ont été promptement corrodées par les acides gras fournis par le condenseur à surface, et provenant des huiles végétales ou animales employées au graissage de la vapeur.

Le carbonate de soude, employé à la neutralisation de ces acides gras, formait, dans les chaudières, une mousse savonneuse qui remplissait le coffre à vapeur.

Le remplacement de ces huiles par les huiles minérales a prolongé notablement la durée des générateurs.

Cependant, pour éviter les dépôts salins sur les foyers et les tubes, on a cherché à réduire au minimum les pertes d'eau et de vapeur, de façon à n'introduire dans l'alimentation qu'un supplément d'eau de mer aussi faible que possible. Quelques compagnies ont même tenu à faire le plein au départ avec de l'eau douce pour que la saturation ne soit réalisée qu'après une très longue traversée.

D'autres compagnies ont installé des distillateurs dont le serpentin était chauffé par de la vapeur.

C'est dans le but de déterminer les dimensions de ces distillateurs que la Compagnie des transports maritimes a fait, en 1873, des expériences très précises

pour constater la quantité d'eau que perdait une machine en marche dans un bon état d'entretien, et sans rejeter de l'eau à la mer par la décharge de la pompe à air.

Elle a déterminé le chiffre de 1/4 de litre par cheval et par heure.

C'est donc 6 000 litres par jour qu'une machine compound de 1 000 chevaux doit se procurer, soit en prenant directement de l'eau à la mer, soit en la distillant.

L'eau de mer contient par litre 0,150 grammes de sulfate de chaux, et n'est saturée à chaud qu'avec 2,000 grammes par litre.

En sorte qu'on peut la concentrer dix à douze fois avant d'avoir un dépôt appréciable de sulfate de chaux.

Et les chaudières ordinaires de 1 000 chevaux, contenant 40 mètres cubes d'eau, ne peuvent pas atteindre la saturation en sulfate de chaux par une introduction journalière de 6 mètres cubes d'eau de mer, même au bout de deux mois.'

Aussi ne constate-t-on la présence des incrustations séléniteuses qu'à la suite d'avaries ayant entraîné une introduction exagérée d'eau de mer dans les chaudières.

Depuis la mise en service des machines à triple expansion, on se trouve en présence d'une nouvelle incertitude.

Quelques accidents graves, survenus au début, dans les chaudières timbrées à 10 ou 12 atmosphères, ont donné à penser que ces chaudières devaient être alimentées exclusivement à l'eau douce; mais la distillation journalière de grandes quantités d'eau de mer a souvent occasionné une dépense de combustible équivalente à l'économie produite par la triple expansion.

Certaines machines, qui dépensaient 21 à 22 tonnes par jour, et qui avaient ramené cette consommation à 17 tonnes par l'emploi de la triple expansion, ont dépensé en route 20 tonnes de charbon, soit 3 tonnes pour le distillateur.

Il y a donc lieu d'examiner si le distillateur est indispensable; et, dans ce cas, les moyens de le rendre moins coûteux.

Un simple calcul montre facilement que les machines à triple expansion, faisant une détente beaucoup plus prolongée que les anciennes machines compound, doivent dépenser plus d'eau, c'est-à-dire en perdre davantage par le presse-étoupe et les purges.

En effet, si on devait retrouver à la fin de la course du grand piston le même poids de vapeur saturée qu'à l'admission au petit cylindre, on n'aurait transformé en travail que la différence entre la chaleur totale de vaporisation d'un kilogramme de vapeur à 180°, et de la même quantité à 80°, soit :

$$661,4 - 630,9 = 30,5 \text{ calories}$$

représentant 13 000 kilogrammètres par kilogramme; tandis que, d'après les

lois de la thermodynamique, 1 kilogramme de vapeur détendu de 180 à 80°, développe 4 500 kilogrammètres ; chiffre réalisé du reste dans la pratique, puisqu'il correspond à une dépense de 6 kilogrammes de vapeur par cheval.

Cette différence de 32 000 kilogrammètres, représentant 75 calories, doit être fournie par la condensation dans le cylindre de 13 à 14 % de la vapeur dépensée.

Aussi a-t-on reconnu l'absolute nécessité d'envelopper les trois cylindres avec une chemise de vapeur pour diminuer les claquements, et que de nombreux constructeurs aient cru nécessaire de remplacer les tiroirs à coquille par des tiroirs ronds, qui sont moins étanches, mais ne risquent pas de se décoller de leur siège sous l'effet des contre-pressions.

Le résultat est, malgré tout, un écoulement d'eau presque continu par tous les presse-étoupes de la partie inférieure des cylindres et des boîtes à tiroirs, et l'obligation de purger très souvent.

Les pertes d'eau par les presse-étoupes des pompes et par les joints sont augmentées par le fait qu'on alimente à une pression deux fois plus élevée.

Il n'est donc pas étonnant que la perte totale d'eau douce, pour une machine à triple expansion de 1 000 chevaux, s'élève à 12 tonnes par 24 heures, au lieu de 6 tonnes, et exige près de 3 tonnes de charbon pour être extraite de l'eau de mer au moyen du distillateur.

D'autre part, si les dépôts sont plus à craindre avec des chaudières à très haute pression, où un coup de feu aurait des conséquences très graves, il y a une raison spéciale pour redouter les effets de l'eau de mer à haute température.

Le chlorure de magnésium est beaucoup moins stable que les autres sels contenus dans l'eau de mer.

Depuis longtemps, on avait reconnu qu'il se décomposait à la température de 120 degrés lorsqu'il se trouvait en dépôt sec sur une tôle chauffée, ce qui amenait la corrosion rapide des cheminées intérieures, si employées autrefois, et qu'on a abandonnées depuis quelques années.

Mais il paraîtrait qu'à 180 degrés, température correspondante à 10 atmosphères, le chlorure de magnésium se décompose, même sous l'eau, en produisant un dégagement d'acide chlorhydrique.

Il est donc indispensable de maintenir dans les chaudières un excès d'alcali capable de neutraliser les effets de l'acide chlorhydrique, par l'addition rationnelle de carbonate de soude, à raison de 5 ou 6 grammes par litre d'eau de mer, introduit dans l'alimentation.

Soit environ 30 kilogrammes par jour pour 1 000 chevaux, puisque l'eau de mer contient environ 5 grammes de chlorure de magnésium par litre.

Je serais même d'avis de remplacer une bonne partie du carbonate par du sul-

fate de soude, qui a la propriété de transformer à chaud le chlorure de magnésium en sulfate de magnésie, très soluble et beaucoup plus stable que le chlorure.

L'expérience faite dans un autoclave à 180° a donné :

Avec de l'eau distillée, peroxyde de fer formé . . .	0 gr. 035
Avec de l'eau additionnée de 1 % de chlorure de magnésium	0 gr. 175
Avec de l'eau additionnée de 1 % de chlorure de magnésium et 2 % de sulfate de soude	0 gr. 110

Dans ce dernier cas la liqueur contenait, après l'expérience, du sulfate de magnésie.

Mais il est utile de conserver une certaine proportion de carbonate de soude pour maintenir à la surface les huiles minérales qui peuvent ainsi être enlevées par des extractions hautes, avant de former, par leur mélange avec les sels de chaux, des boules graisseuses assez denses pour tomber au fond de la chaudière.

Pour ne pas introduire de sels de magnésie dans les chaudières, il faudrait, au préalable, épurer l'eau de mer, comme on le fait dans l'industrie pour les eaux magnésiennes, au moyen du carbonate et du silicate de soude, mais cela forcerait à employer, dans la navigation, des appareils auxquels le personnel n'est pas habitué.

Reste donc la distillation, au moins pour la pratique journalière et normale.

Si on alimente le serpentin du distillateur avec de la vapeur fraîche, pour envoyer les produits de la distillation au condenseur, la dépense est très considérable puisque cette vapeur ne produit aucun travail.

Un constructeur de Bordeaux a cherché à réduire la dépense, en prenant la vapeur chaude à sa sortie du premier cylindre, et en envoyant la vapeur produite à la boîte à tiroir du grand cylindre.

On récupère ainsi plus de la moitié du travail qu'aurait produit la vapeur en se détendant dans les trois cylindres. Mais l'ingénieur de la Compagnie Paquet a eu l'heureuse idée de n'envoyer au serpentin que la vapeur qui s'échappe du grand cylindre après avoir accompli un cycle complet, il fait naturellement évacuer au condenseur, et la purge du serpentin et les produits de la distillation. L'appareil distillatoire devient ainsi une annexe du condenseur et ne coûte rien à la machine.

Cet appareil fonctionne à la façon du 3^e groupe d'un appareil de sucrerie à triple effet, puisqu'il est chauffé avec de la vapeur à 80 degrés et évacue à la pression de 1/5 d'atmosphère du condenseur, soit à 60 degrés environ.

Les mêmes précautions doivent être prises que dans les appareils de sucrerie, pour éviter les entraînements d'eau salée et pour l'extraction des eaux saturées.

Seulement les distillateurs ordinaires de 12 tonnes, ne peuvent pas produire, avec cette disposition, plus de 6 tonnes, à cause de la faible chute de température entre l'entrée et la sortie.

CONCLUSIONS

1° Il n'y a généralement pas avantage à transformer en triple expansion (à tripler) les machines anciennes, et on devra se borner à les améliorer en élevant la pression des chaudières à 7 ou 8 kilogrammes et en augmentant la détente à chacun des cylindres.

2° Les machines neuves à triple expansion, réalisant une détente effective de 12 à 15 fois, devront avoir des chemises de vapeur aux trois cylindres, et des purgeurs automatiques à toutes les boîtes à tiroir, voir même aux fonds des cylindres.

Toutes les purges devront aboutir au condenseur ou à la bâche, pour ne rien laisser perdre.

Leurs pompes alimentaires seront aussi réduites que possible pour être plus étanches et ne pas pomper de l'air.

Le robinet de supplément devra être extrêmement petit pour empêcher tout abus d'eau de mer.

3° Les pertes normales seront remplacées par l'eau douce produite par un distillateur à basse température alimenté par la vapeur qui sort du second, ou du troisième cylindre.

4° Les pertes dues aux fuites et aux extractions seront compensées par des introductions modérées d'eau de mer, en ayant soin d'introduire dans l'alimentation environ 30 kilogrammes, par jour et par mille chevaux, de carbonate de soude cristallisé ou d'un mélange de carbonate et de sulfate de soude.

5° Enfin, pour les traversées de 2 ou 3 jours, en moyenne, le distillateur peut être supprimé, à la condition de vider les chaudières à chaque voyage et d'injecter par jour 30 kilogrammes de carbonate de soude pour 1 000 chevaux ou 45 kilogrammes de sulfate de soude.

DEUXIÈME QUESTION

ÉTUDE

SUR LES

ESSAIS DES FERS ET DES ACIERS

RAPPORT DE M. E. CORNUT

INGÉNIEUR EN CHEF DE L'ASSOCIATION DES PROPRIÉTAIRES
D'APPAREILS A VAPEUR DU NORD DE LA FRANCE

Les métaux employés dans la construction des machines doivent présenter des propriétés très différentes, suivant la nature du travail que devra supporter l'organe à construire.

La pratique a prouvé que les qualités des métaux que l'on doit étudier, pour satisfaire aux divers besoins de la mécanique, peuvent se résumer dans les suivantes :

Ténacité — élasticité — homogénéité — ductilité et soudabilité.

Il me paraît donc nécessaire, en commençant ce travail, de rechercher les usages qui ont prévalu dans la pratique pour procéder à la réception des fers et aciers, c'est-à-dire pour s'assurer que les métaux présentent bien les qualités exigées par les cahiers des charges.

L'État pour ses différents services, la Marine, l'Artillerie, etc., et les Compagnies de chemins de fer, ont des cahiers des charges fort bien étudiés; nous allons rapidement les passer en revue.

Dans ce travail, je ne dois examiner que ce qui touche à la Mécanique proprement dite, je ne m'occuperai donc que de la réception des fers de forge, tôles de fer, tôles d'acier, aciers divers.

Marine Française

TOLES DE FER

La Marine française a, par une circulaire ministérielle en date du 17 février 1868, classé les tôles de fer nécessaires à ses différents usages en quatre catégories.

1^{re} catégorie : *Tôles communes*. — Désignation commerciale : *Tôles communes améliorées*.

2^e catégorie : *Tôles ordinaires*. — Désignation commerciale : *Fers forts*.

3^e catégorie : *Tôles supérieures*. — Désignation commerciale : *Fers forts supérieurs*.

4^e catégorie : *Tôles fines*. — Désignation commerciale : *Tôles forgées, tôles aux bois*.

Cette administration soumet ces métaux à deux séries d'épreuves, des essais à chaud et des essais à froid.

ÉPREUVES A CHAUD

Tôles communes. — Il sera exécuté avec un morceau de tôle de dimension convenable, découpé dans une feuille prise au hasard dans chaque livraison, un cylindre ayant pour hauteur et pour diamètre intérieur, vingt-cinq fois l'épaisseur de la tôle. Ce cylindre, exécuté avec le soin convenable, ne devra présenter ni fentes ni gerçures.

Cette expérience sera faite pour toutes les tôles d'épaisseurs différentes, elle pourra être renouvelée, si la commission de recette le juge nécessaire.

Tôles ordinaires. — Il sera exécuté, avec un morceau de tôle de dimension convenable, découpé dans une feuille prise au hasard dans chaque livraison, une calotte sphérique avec bord plat conservé dans le plan primitif de la tôle. La corde de cette calotte, mesurée intérieurement, sera égale à trente fois l'épaisseur de la tôle, et sa flèche, mesurée intérieurement, sera égale à cinq fois cette même épaisseur. Le bord plat circulaire de cette pièce aura pour longueur sept fois l'épaisseur de la tôle et sera raccordé à la partie sphérique par un congé, ayant pour rayon l'épaisseur même de la tôle. Ce congé sera mesuré dans l'intérieur de l'angle.

La calotte, ainsi exécutée avec tout le soin nécessaire, ne devra présenter ni fente ni gerçures.

Cette expérience sera faite pour toutes les tôles d'épaisseurs différentes : elle pourra être renouvelée si la commission de recette le juge nécessaire.

Tôles supérieures. — Il sera exécuté, avec un morceau de tôle de dimension convenable, découpé dans une feuille prise au hasard dans chaque livraison, une calotte sphérique avec bord plat conservé dans le plan primitif de la tôle. La corde de cette calotte, mesurée intérieurement, sera égale à trente fois l'épaisseur de la tôle, et la flèche, mesurée aussi intérieurement, sera égale à dix fois cette même épaisseur. Le bord plat circulaire de cette pièce aura pour largeur sept fois l'épaisseur de la tôle, et sera raccordé à la partie sphérique par un congé, ayant pour rayon l'épaisseur même de la tôle. Ce congé sera mesuré dans l'intérieur de l'angle.

La calotte, ainsi exécutée avec tout le soin nécessaire, ne devra présenter ni fente ni gerçures.

Cette expérience sera faite pour toutes les tôles d'épaisseurs différentes ; elle pourra être renouvelée si la commission de recette le juge nécessaire.

Tôles fines. — Il sera exécuté, avec un morceau de tôle de dimension convenable, découpé dans une feuille prise au hasard dans chaque livraison, une calotte sphérique, avec bord plat, conservé dans le plan primitif de la tôle. La corde de cette calotte, mesurée intérieurement, sera égale à trente fois l'épaisseur de la tôle, et la flèche, mesurée aussi intérieurement, sera égale à quinze fois cette même épaisseur. Le bord plat circulaire de cette pièce aura pour largeur sept fois l'épaisseur de la tôle, et sera raccordé à la partie sphérique par un congé ayant pour rayon l'épaisseur même de la tôle. Ce congé sera mesuré dans l'intérieur de l'angle.

La calotte, ainsi exécutée avec tout le soin nécessaire, ne devra présenter ni fentes ni gerçures.

En outre, il sera confectionné avec un second morceau de tôle pris dans la même feuille ou dans une seconde feuille, une cuve à base carrée et à bords relevés d'équerre ; le fond de cette cuve aura pour côté trente fois l'épaisseur de la tôle, et les bords, mesurés en dedans, auront pour hauteur sept fois cette même dimension.

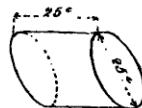
Ces bords seront raccordés entre eux et avec le fond par un congé qui, mesuré dans l'intérieur de l'angle, aura pour rayon l'épaisseur même de la tôle. La cuve ainsi exécutée, ne devra présenter ni fentes, ni gerçures, et il ne devra s'y manifester aucune trace de dédoublure.

Ces deux expériences seront faites pour toutes les tôles d'épaisseurs différentes ; elles pourront être renouvelées si la commission de recette le juge nécessaire.

Nous résumons dans un tableau les essais à chaud de la Marine :

TABLEAU DES ÉPREUVES À CHAUD

Tôles communes. Cylindre.

 e = épaisseur de la tôle.Tôles ordinaires. Calotte sphérique $e =$ »Tôles supérieures. » » $e =$ »Tôles fines. » » $e =$ »» » Cuve à base carrée. $e =$ »

ÉPREUVES À FROID.

Les épreuves à froid comprennent seulement des essais à la traction, il nous suffira donc d'indiquer la manière d'opérer pour une des qualités de tôles.

Épreuves à froid. — Ces épreuves consisteront à déterminer la force de rupture des tôles et leur faculté d'allongement, tant dans le sens du laminage que dans le sens perpendiculaire.

On établira séparément des résultats moyens de résistance et d'allongement, obtenus dans chacun de ces deux sens, au moyen de cinq épreuves au moins pour chacun d'eux.

Dans le sens qui aura donné la moindre résistance, la charge de rupture moyenne, par millimètre carré de section, sera d'au moins kilogrammes, et l'allongement moyen correspondant d'au moins pour cent.

En outre, aucune épreuve isolée, faite sur une bande reconnue saine, ne devra donner un résultat inférieur à kilogrammes par millimètre carré, ni un allongement inférieur à pour cent.

Pour ces épreuves, on découpera des bandes de tôle dans un certain nombre de feuilles prises au hasard, dans chaque livraison, en ayant soin d'expérimenter pour chaque feuille un nombre égal de bandes dans le sens du laminage, et dans le sens perpendiculaire. Ces bandes seront façonnées de manière à avoir pour section de rupture un rectangle, dont l'un des côtés aura 30 millimètres de largeur et l'autre l'épaisseur de la tôle. Par exception, pour les tôles minces au-dessous de 5 millimètres, la largeur de la bande d'épreuve sera réduite à 20 millimètres. La longueur de la partie prismatique soumise à la traction sera toujours de 200 millimètres.

Ces bandes seront soumises, au moyen de poids agissant directement ou par l'intermédiaire de leviers tarés avec soin, à des efforts de traction croissant jusqu'à ce que la rupture ait lieu.

La charge initiale sera calculée de manière à produire un effort de traction de kilogrammes par millimètre carré de section ; cette première charge sera maintenue en action pendant cinq minutes. Les charges additionnelles seront ensuite placées à des intervalles de temps sensiblement égaux et d'environ une minute. Elles seront calculées, aussi approximativement que le permettra la division des poids en usage, à raison de un quart de kilogramme de traction par millimètre carré de section.

On notera, pour chaque charge, l'allongement correspondant mesuré sur la longueur prismatique de 20 centimètres.

Lorsque les tôles présentées en recettes seront des bandes pour barrots, élongis, entremises, barrotins, ceintures et banquières de plus de 5 mètres de longueur et de moins de 0^m,50^{cm}. de largeur, les moyennes des résultats obtenus ne devront pas être inférieures aux chiffres suivants :

	En long.	En travers.
<hr/>		
Charge de rupture par millimètre carré de section. —		
Tôles communes	32 ^k	26 ^k
Tôles ordinaires	34 ^k	28 ^k
<hr/>		
Allongement correspondant à cette charge. — Tôles		
communes	6 p. %	2,5 p. %
Tôles ordinaires	9 p. %	3,5 p. %

Les livraisons qui ne satisferont pas à ces conditions seront rebutées.

Le tableau ci-dessous donne les charges et allongement imposés par la Marine, pour les différentes natures de tôles de fer.

	SANS LA MOINDRE RÉSISTANCE		MINIMUM dans les épreuves isolées		Charge initiale.
	Moyenne de la résist. par m/m ² de section.	Allongem. moyen 0/0.	Résistance par m/m ² de section.	Allongem. 0/0.	
	kil.	kil.	kil.	kil.	
Tôles communes	28	3.5 %	25	2.5 %	25
Tôles ordinaires	31	5 »	28	4 »	28
Tôles supérieures	32	7 »	29	5.5 »	29
Tôles fines	35	10 »	30	7.5 »	29

TOLES D'ACIER

Une instruction du Ministre de la Marine, en date du 9 février 1885, modifiant les anciennes circulaires de 1876 et 1877, fixe les conditions des épreuves de recette des tôles et barres profilées en acier.

Pour s'assurer de la qualité des tôles et bandes d'acier, il sera fait trois sortes d'épreuves : 1^o des épreuves à froid ; 2^o des épreuves à chaud ; 3^o des essais de trempe.

1^o ÉPREUVES A FROID.

Ces épreuves auront pour but de déterminer la résistance à la rupture, et la faculté d'allongement du métal, tant dans le sens du laminage, que dans le sens perpendiculaire (toutefois, quand la largeur sera suffisante).

On établira séparément les résultats moyens de résistance et d'allongement obtenus dans ces deux sens, au moyen de cinq épreuves au moins pour chacun d'eux.

Pour ces épreuves on découpera des barrettes dans un certain nombre de feuilles ou bandes prises au hasard dans chaque livraison. Ces barrettes seront façonnées de manière à avoir pour section un rectangle, dont le petit côté aura l'épaisseur de la tôle, et dont le grand côté aura 30 millimètres pour les tôles de 4 millimètres et au-dessus, et 20 millimètres pour les tôles de moins de 4 millimètres, c'est-à-dire pour les tôles dites minces. Toutefois, pour les tôles de 20 millimètres et au-dessus, la largeur devra être la même que l'épaisseur, de sorte que la section de la barrette sera un carré ayant cette épaisseur pour côté.

La longueur de la partie prismatique soumise à la traction sera toujours exactement de 20 centimètres, et délimitée par deux coups de pointeau, à partir desquels il y aura un congé de raccordement avec les têtes, de telle sorte que la rupture ait toujours lieu en dedans des coups de pointeau.

Dans aucun cas les barrettes ne devront être recuites, après avoir été détachées des feuilles de tôles.

Chaque barrette sera soumise à une charge initiale déterminée, de manière à produire un effort de traction égal aux 8/10 de l'effort de rupture, calculé d'après les données du tableau ci-après. Cette première charge sera maintenue en action pendant une minute, à moins qu'au bout de ce laps de temps, la barrette continue à s'allonger ; on attendra pour ajouter une charge, la fin de l'allongement.

On ajoutera de quart en quart de minute, des charges successives à raison de 1/2 kilogramme par millimètre carré de section ; ces intervalles devront toujours être prolongés, quand il y aura lieu, c'est-à-dire de telle sorte

qu'une charge nouvelle ne soit jamais ajoutée, tant que la barrette continue à s'allonger sous la charge précédente. On notera, pour chaque charge, l'allongement correspondant, mesuré sur la longueur entre pointeaux de 20 centimètres.

Aucune barrette d'épreuve reconnue saine ne devra se rompre sous la charge initiale, quel que soit l'allongement correspondant, ni donner un allongement final inférieur aux 8/10 de l'allongement final moyen exigé, quelle que soit la charge de rupture correspondante.

Les charges de rupture moyennes *minima* par millimètre carré de la section primitive, et les allongements p. % moyens *minimum* exigés des barrettes soumises aux épreuves, sont donnés par le tableau n° 1 ci-après, pour les tôles, et par le tableau n° 2 pour les bandes ou couvre-joints.

On remarquera que pour les tôles, il n'est pas fait de distinction entre les résultats qu'on devra exiger dans le sens longitudinal et dans le sens transversal. Les chiffres du tableau n° 1 devront être obtenus aussi bien dans un sens que dans l'autre.

Il n'en est pas de même pour les bandes. Ici, en effet, par le mode de laminage, la résistance et l'allongement dans le sens longitudinal doivent être plus grands que dans le sens transversal ; de plus, pour les bandes étroites, on ne pourra pas, dans la plupart des cas, détacher des barrettes dans le sens transversal. C'est pourquoi le tableau n° 2 porte des coefficients différents dans les deux sens.

TABLEAU N° 1

Tôles

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	TÔLES pour construction.		TÔLES pour chaudières	
	charge moyenne minima.	allongem. final moyen minimum pour cent.	charge moyenne minima.	allongem. final moyen minimum pour cent.
kg.		kg.		
De 1 1/2 à 2 exclusivement.....	47	10	»	»
De 2 à 3 id.	46	13	»	»
De 3 à 4 id.	45	16	»	»
De 4 à 6 id.	45	18	45	22
De 6 à 8 id.	43	21	42	25
De 8 à 20 id.	42	22	42	26
De 20 à 30 inclusivement.....	42	24	40	26

Il sera accordé, sur les résistances moyennes *minima*, une tolérance pouvant aller jusqu'à 2 kilogrammes, pourvu que ce déficit soit compensé par un accroissement d'allongement, de telle sorte que la somme des résistances et des allongements portés au tableau ne soit pas diminuée. Il ne sera accordé aucune tolérance en moins sur les allongements.

TABLEAU N° 2

Bandes ou couvre-joints

ÉPAISSEUR EN MILLIMÈTRES	EN LONG		EN TRAVERS	
	charge moyenne minima.	allongem. final moyen minimum pour cent.	charge moyenne minima.	allongem. final moyen minimum pour cent.
De 1/2 à 4 exclusivement.....	kg.		kil.	
De 4 à 6 id.	47	13	45	12
De 5 à 8 id.	46	19	44	17
De 8 à 20 id.	44	22	42	20
De 8 à 20 id.	43	23	41	21
De 20 à 30 inclusivement.....	43	25	41	23

Il est accordé sur les résistances une tolérance en moins dans les mêmes limites, et avec les mêmes compensations en allongement, que pour les tôles.

2° ÉPREUVES A CHAUD.

L'épreuve consistera à exécuter avec un morceau de tôle de dimensions convenables, une calotte hémisphérique avec bord plat conservé dans le plan primitif de la tôle.

Le diamètre de la demi-sphère, mesuré intérieurement, sera égal à 40 fois l'épaisseur de la tôle, et le bord plat circulaire aura pour largeur 10 fois cette même dimension ; ce bord plat sera raccordé à la partie sphérique, par un congé dont le rayon mesuré dans l'intérieur de l'angle sera, au maximum égal à l'épaisseur de la tôle.

En outre, pour les tôles de plus de 5 millimètres d'épaisseur, il pourra être confectionné une cuve à base carrée, à bords relevés d'équerre ; la base de cette cuve aura pour côté trente fois l'épaisseur de la tôle, et les bords mesurés en dedans auront pour hauteur dix fois cette même épaisseur. Le fond de cette cuve sera percé, au milieu, d'un trou circulaire, avec bords relevés perpendiculairement au plan du fond, et du côté opposé à celui des bords de la cuve. Le dia-

mètre de ce trou, mesuré intérieurement après travail fini, sera de vingt fois l'épaisseur de la tôle, et la hauteur du bord relevé sera de cinq fois cette même épaisseur. Tous les angles seront arrondis ; leur congé intérieur aura pour rayon l'épaisseur de la tôle.

Les pièces ainsi exécutées, avec toutes les précautions qu'exige le travail de l'acier, ne devront présenter ni gerçures, ni fentes, lors même qu'elles auront été refroidies dans un courant d'air vif.

L'épreuve de la cuve n'est pas obligatoire. Elle est laissée à l'appréciation de l'Ingénieur chargé de la recette.

3^e ESSAIS DE TREMPÉ.

Pour ces essais, on découpera, dans les feuilles de tôles présentées en recette, des barreaux de 26 centimètres de longueur sur 4 centimètres de largeur, tant dans le sens du laminage que dans le sens du travers ; pour les bandes et les couvre-joints, ils ne seront pris que dans le sens de la longueur. Les barreaux préparés pour ces essais ne devront pas avoir leurs rives longitudinales arrondies ; on tolérera seulement que l'acuité des angles soit enlevée à la lime douce. Ils seront chauffés uniformément, de manière à être amenés au rouge cerise un peu sombre, puis trempés dans l'eau à 28°. Ainsi préparés, ils devront pouvoir prendre, sous l'action de la presse, sans présenter de traces de rupture, une courbe permanente dont le rayon *minimum*, mesuré intérieurement, ne devra pas être supérieur à l'épaisseur du barreau expérimenté.

Ces mêmes barreaux, lorsqu'il s'agira de tôles pour chaudières, devront pouvoir, sous l'action de la presse et sans présenter de traces de rupture, être pliés en deux à plat, de manière que les deux moitiés soient complètement appliquées l'une sur l'autre.

Les tôles qui ne satisferont pas aux conditions détaillées ci-dessus seront rebutées.

Essais de la Marine Royale Anglaise

Dans la Marine Royale Anglaise et dans le cas de navires construits pour le Gouvernement par des particuliers, les matières subissent un examen approfondi et sévère que M. Reed résume ainsi : Le fer est fourni par les fabricants sous la condition des épreuves suivantes qui se font, autant que possible, de la même façon dans les établissements publics et privés sous la surveillance des officiers de l'Amirauté.

FERS POUR TÔLES (1^{re} CLASSE) BB (BEST-BEST. — TÔLES SUPÉRIEURES).

EFFORT DE RÉSISTANCE PAR MILLIMÈTRE CARRÉ. -- EN LONG 35 KIL. —
EN TRAVERS 28 KIL.

Epreuves de forge, à chaud.

Toutes les tôles supérieures de 25 millimètres d'épaisseur et au-dessous, doivent être assez ductiles pour se plier à chaud sans rupture, sous les angles de 125° en long et 90° en travers.

Epreuves de forge, à froid.

Toutes les tôles supérieures doivent subir sans rupture, les angles suivants, en long ou dans le sens des fibres :

Tôles de 25 millimètres et 23 m/m 5 d'épaisseur	15°
— 22 et 20,5	20°
— 19 et 17	25°
— 15,5, 14 et 12,5.	35°
— 11 et 9	50°
— 7,5 et 6	70°
— 4,5 et au-dessous.	90°

En travers ou perpendiculairement aux fibres :

Tôles de 25, 23,5, 22 et 20,5	5°
— 19 et 17	10°
— 15,5, 14 et 12,5.	15°
— 11 et 9	20°
— 7,5 et 6	30°
— 4,5 et au-dessous.	40°

FERS POUR TÔLES (SECONDE CLASSE) B. (BEST. — TÔLES ORDINAIRES).

EFFORT DE RÉSISTANCE PAR MILLIM. CARRÉ. — EN LONG, 31 K. 5. —
EN TRAVERS, 26 K. 5.

Epreuves de forge, à chaud.

Toutes les tôles ordinaires de 25 millimètres d'épaisseur et au-dessous doivent être assez ductiles pour se plier à chaud sans rupture, aux angles suivants : en long 90° et en travers 60°.

Epreuves de forge, à froid.

Angles à supporter sans rupture ; en long :

Tôles de 25 et 23,5	10°
— 22 et 20,5	15°
— 19 et 17	20°
— 15,5, 14 et 12,5.	30°
— 11 et 9	45°
— 7,5 et 6	55°
— 4,5 et au-dessous.	75°

En travers :

Tôles de 19 et 17	5°
— 15,5 14 et 12,5.	10°
— 11 et 9	15°
— 7,5 et 6	20°
— 4,5 et au-dessous.	30°

« Les tôles à froid, comme à chaud, seront essayées sur une table en fonte présentant une surface plane, le bord coupé à angle droit, l'arête arrondie avec un rayon de 12 millim. 5.

« Le morceau de tôle essayé à froid comme à chaud, doit avoir 1^m20 de long pour le grand côté du rectangle, et toute la largeur de la tôle pour les épreuves dans l'autre sens. Les tôles seront ployées à une distance de l'arête comprise entre 7,5 et 15 centimètres. Il est entendu que tous les fers devront pouvoir subir les épreuves ci-dessus, quand on les prend dans les dimensions déjà définies, s'il est nécessaire d'essayer d'aussi grandes pièces ; mais un morceau plus petit répondra généralement à tous les besoins. Toutes les tôles seront exemptes de tout défaut de laminage et de toute imperfection de surface. On devra prendre au hasard une tôle dans chaque épaisseur, à chaque livraison, pourvu que le nombre des feuilles livrées ne dépasse pas 50. Au-dessus de ce chiffre on en prend une autre par chaque cinquantaine ou fraction de cinquantaine. Quand on livre en même temps des tôles de plusieurs épaisseurs et qu'il n'y a que peu de tôles de chaque épaisseur, on peut se dispenser de faire un essai particulier pour chacune d'elles ; mais aucun lot ne peut être rebuté si l'on n'a éprouvé une tôle de ce lot. »

Toutes les tôles doivent porter le nom du fabricant et l'indication de la qualité.

TOLES ET CORNIÈRES D'ACIER

« Les épreuves de traction et de forge que l'acier doit subir sont les suivantes :

« Résistance en kilog. par millimètre carré.. { En long 52 kil.
En travers 47 kil.
« en aucun cas la résistance ne doit dépasser 63 kil. par millimètre carré,

Epreuves de forge à chaud. — Angle à supporter en long, 140°, en travers 110°.

Epreuves de forge à froid. — Toutes les tôles devront pouvoir être ployées à froid sans déchirure, sous les angles suivants :

EN LONG		EN TRAVERS	
25 millimètres.	30°	25 millimètres.	20°
22 »	40°	22 »	25°
19 »	50°	19 »	30°
15,5 »	60°	15,5 »	35°
12,5 »	70°	12,5 »	40°
11 »	75°	11 »	50°
9 »	80°	9 »	60°
7,5 »	85°	7,5 »	65°
6 » et au-dessous.	90°	6 »	70°

Compagnies de chemins de fer

Les Compagnies de chemins de fer emploient le fer et l'acier pour les usages les plus variés de la mécanique ; il m'a donc paru très intéressant de donner communication de leurs cahiers des charges dans les parties les plus importantes qui concernent les essais des fers de forge, des tôles de fer et d'acier.

Compagnie des Chemins de fer de l'Est

FERS DE FORGE

Les fers de forge sont classés en cinq qualités, savoir :

Qualité spéciale à rivets « *dite fer de Suède* » correspondant à l'indice R.

1^{re} qualité « *dite fer fin au bois* » correspondant à l'indice B ;

2^e qualité « *dite fer fort supérieur* » correspondant à l'indice S ;

3^e qualité « *dite fer fort* » correspondant à l'indice F ;

4^e qualité « *dite fer ordinaire* » correspondant à l'indice O ;

Chaque qualité se subdivise elle-même en 3 catégories :

1^o En fers à grain correspondant à l'indice G.

2^o En fers à nerf » » N.

3^o En fers mixtes » » M.

Les textures doivent correspondre à ces catégories.

ESSAIS

Chaque essai comprend :

- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 ^o Epreuves
à chaud. | Une épreuve de crochet.
Id. de rabattement.
Id. de trous. |
| 2 ^o Epreuves
à froid. | Une épreuve d'homogénéité (étude de la texture).
Id. de pliage à froid, lorsque les épreuves à chaud ne peuvent avoir lieu.
Une épreuve par traction |
| | (a) sur un barreau prélevé à froid ou préalablement laminé.
(b) sur un barreau, rompu en deux parties, ressoudé et forgé. |

Les morceaux d'essais sont prélevés au choix des agents réceptionnaires dans les barres désignées par eux et cisaillées en leur présence.

Epreuve d'homogénéité. — Pour cet essai, les barres sont entaillées au burin ou à la tranche, et rompues brusquement par des coups frappés en porte à faux avec des marteaux à devant.

Les cassures doivent être sans aucun défaut et présenter la caractéristique parfaite de la texture demandée par le marché ou la commande.

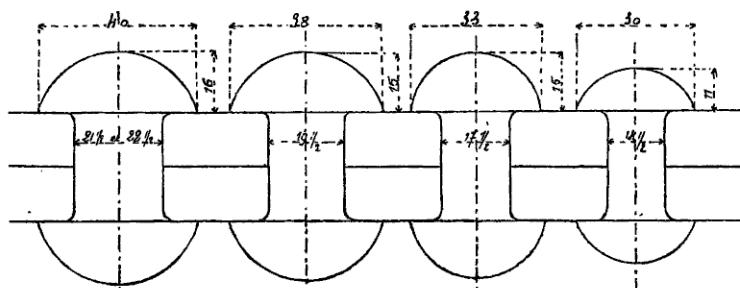
Dans les fers à grain, le grain doit être uniforme, demi-fin, de couleur gris-clair, sans présenter de facettes larges et brillantes.

Dans les fers à nerf, le nerf doit être blanc, délié, allongé et sans éclat, les fibres ne seront ni courtes, ni noirâtres.

ÉPREUVES À CHAUD

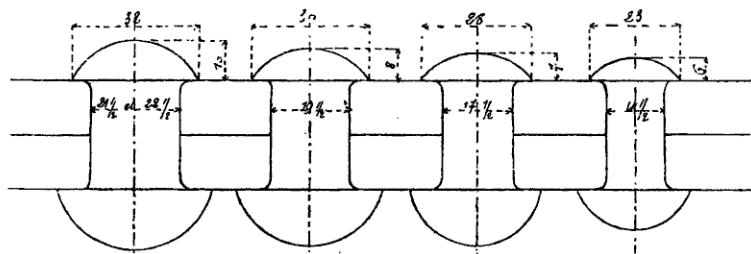
La ductilité du métal est constatée au moyen des épreuves ci-après :

1^o *Epreuves de rivets.* — Pour le fer de qualité spéciale à rivets. Confection des têtes. Les têtes de rivets ayant les dimensions indiquées ci-dessous devront être obtenues, à chaud n° 1, sans criques, et à froid n° 2, sans criques ni gercures.

RIVURES À CHAUD.
N° 1.

RIVURES A FROID.

N° 2.



2^e Epreuve des crochets à chaud. — Cette épreuve consiste à forger l'extrémité des barres choisies pour l'essai, en rondin d'à peu près 0^m,020 de diamètre sur une longueur d'environ 0^m,200.

Ce rondin, porté au blanc soudant, est rabattu par son milieu de façon à former un crochet à l'équerre, dont l'angle intérieur aura pour rayon du congé, la moitié du diamètre, soit 10 millimètres. Ce crochet est redressé, puis reformé en sens inverse et ainsi de suite jusqu'à rupture de l'extrémité de l'éprouvette.

Ces diverses opérations sont faites en une seule chaude et le nombre minimum de redressements doit être, respectivement pour les quatre qualités, de :

20 pour le fer qualité spéciale à rivets.

18 pour le fer de 1^{re} qualité.

8 d° 2^e d°

6 d° 3^e d°

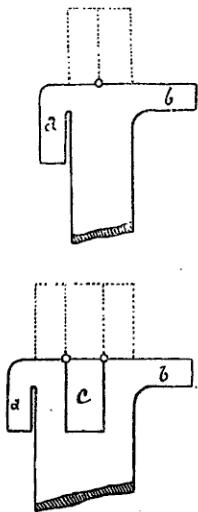
4 d° 4^e d°

3^e Epreuve de rabattement à chaud. — Cette épreuve a lieu sur les fers carrés et plats. L'éprouvette choisie pour cet essai est portée au blanc soudant puis fendue sur plat à la tranche, à l'une de ses extrémités sur une longueur de 0^m,100 limitée par un petit trou.

Les deux parties ainsi formées sont ensuite renversées au marteau. Pour les trois premières qualités de fer, les bords renversés viennent s'appliquer sur les faces de la barre éprouvée comme en *a* du croquis ci-contre ; pour la 4^e qualité, ces mêmes bords sont seulement rabattus à angle droit *b*.

Lorsque la largeur du fer à essayer sera supérieure à 8 fois l'épaisseur, l'épreuve de rabattement aura lieu de la façon suivante :

L'éprouvette choisie sera portée au blanc soudant, puis fendue sur plat, à la tranche, de chaque côté, sur une largeur égale à trois fois l'épaisseur du fer. Les parties *a*



et *b* seront, suivant les qualités, rabattues sur champ dans les conditions définies ci-dessus, mais la partie centrale *c* sera dans l'autre sens également rabattue, à bloc pour les trois premières qualités, ou à angle droit pour la quatrième.

Dans ces opérations qui auront lieu en une seule chaude, il ne devra se produire aucune crique ou fente sur le bord des trous limitant les fentes pratiquées à la tranche.

4^e Epreuves des trous à chaud. — Cette épreuve a lieu sur les fers carrés, ronds, et sur les fers plats dont une des dimensions ne dépasse pas 8 fois l'autre, ou dont l'épaisseur ne sera pas moindre de 10 millimètres.

Les fers carrés et ronds devront préalablement être ramenés par forgeage à une section rectangulaire égale, en épaisseur, au tiers du côté du carré ou du diamètre primitif.

L'épreuve consiste à porter au blanc soudant l'éprouvette choisie, et à la percer, pendant la même chaude, au poinçon conique, de deux trous espacés de 10 millimètres et ayant chacun, par rapport à la largeur du fer essayé, un diamètre égal à 0^m,85 de cette largeur pour le fer spécial à rivets, à 0^m,75 pour les fers de 1^{re} et 2^{re} qualité, et à la moitié seulement pour les fers de 3^{re} et de 4^{re} qualité.

Le perçement des deux trous ne doit produire aucune fente ni gerçure, bien que le deuxième trou ne soit terminé qu'au rouge sombre.



EPREUVES A FROID

Epreuve de pliage à froid. — Sur tous les fers réduits à un diamètre de 20 à 25 millimètres par laminage ou forgeage, et sur ceux dont les dimensions de section ne permettent pas d'effectuer les épreuves ci-dessus, il sera fait un essai de pliage à froid dans les conditions ci-après :

	Angle de pliage minimum	Rayon de raccordement des 2 branches de l'angle	Angle de redressement (2)	
Fers de Suède, qualités spéciales à rivets	15°	1e(1)	180°	(1) e = épaisseur du fer ou diamètre.
Fers de 1 ^{re} qualité	30°	1e	180°	(2) Redressement non imposé pour les fers au-dessus de 12 m/m d'épaisseur ou de diamètre.
D° 2 ^{re} d°	60°	1e 1/2	180°	
D° 3 ^{re} d°	90°	2e	180°	
D° 4 ^{re} d°	120°	3e	180°	

Les morceaux ainsi essayés ne doivent présenter ni gercures, ni déchirures, ni défaut quelconque.

Epreuves par traction. — Le degré de ténacité et d'élasticité des fers est constaté au moyen d'épreuves par traction, effectuées sur des barreaux pris à la convenance des agents réceptionnaires dans les barres présentées, découpés directement à froid ou laminés devant eux comme il est dit ci-après :

Ces barreaux, selon que les fers seront ronds, carrés ou plats, devront avoir la forme de cylindres ou de prismes à base rectangulaire.

Les fournisseurs devront se pourvoir de jeu de griffes, permettant d'effectuer les essais par traction sur les barreaux tels qu'ils proviennent des barres brutes. Toutefois, lorsque la forme ou les dimensions des sections ne le permettront pas, on égalisera la partie calibrée des éprouvettes, soit au tour pour les éprouvettes rondes, soit en façonnant les éprouvettes plates ou carrées, dans les conditions de dimensions déterminées ci-après pour les parties calibrées.

Dans les fers plats dont la section est trop forte ou la largeur trop grande pour être essayés tels quels sur la machine d'essai, les bandes convenables, dont l'agent réceptionnaire fixera les dimensions, seront obtenues à la raboteuse ou par tout autre moyen.

S'il s'agit de fers ronds et carrés présentant une section plus forte que le comporte la puissance maxima de la machine d'essai, ces fers seront ramenés au diamètre de 20 millimètres par un laminage effectué en présence de l'agent réceptionnaire.

Ce laminage aura lieu en une seule chaude, à la température du commencement de la chaude suante. Les barres laminées seront refroidies naturellement côté à côté et ne subiront aucun recuit.

Ces diverses éprouvettes doivent toujours porter sur chaque tête les poinçons de la Compagnie.

Les allongements seront relevés d'après des distances entre repères fixées comme suit :

1^o *Eprouvettes cylindriques (tournées).*

PARTIE CALIBRÉE					
Diamètres	Distances entre repères	Diamètres	Distances entre repères	Diamètres	Distances entre repères
5 à 9 m/m	100 m/m	21 à 25 m/m	200 m/m	36 à 40 m/m	330 m/m
10 à 14 m/m	130 m/m	26 à 30 m/m	250 m/m	41 à 45 m/m	370 m/m
15 à 19 m/m	170 m/m	31 à 35 m/m	290 m/m	46 à 50 m/m	410 m/m

L'éprouvette cylindrique tournée à employer de préférence est celle de 20 millimètres de diamètre, à la partie calibrée, et de 200 millimètres, entre les repères pointés pour la mesure de l'allongement. En cas de difficultés spéciales et sur les indications de l'agent réceptionnaire, les diamètres d'éprouvette pourront être modifiés, à la condition expresse que la distance entre repères soit déterminée comme il est dit au tableau ci-dessus.

2^e Eprouvettes cylindriques (brutes).

La distance entre repères est fixée à neuf fois le diamètre du barreau à soumettre à l'épreuve.

3^e Eprouvettes carrées.

A dix fois le côté du carré.

4^e Eprouvettes méplates.

SÉRIES DES ÉPAISSEURS.	DISTANCE entre repères	PARTIE CALIBRÉE		OBSERVATIONS
		Largeur.	Longueur.	
5 m/m et au-dessous....	100 m/m			
5 1/2 à 11 m/m.....	130 m/m			
11 1/2 à 17 m/m.....	170 m/m	20 m/m	200 m/m	
17 1/2 à 23 m/m	200 m/m			
23 1/2 à 29 m/m.....	280 m/m			
29 1/2 et au-dessus	300 m/m	30 m/m	300 m/m	Le groupement en série d'épaisseurs a été établi avec mêmes largeurs et mêmes longueurs calibrées, pour permettre la préparation des barreaux en paquets par mortaisage ou rabotage.

Pour les fers plats d'une largeur au-dessous de 20 millimètres, les distances entre repères sont néanmoins déterminées comme il est dit ci-dessus.

Les éprouvettes seront soumises à des efforts de traction croissant jusqu'à la rupture.

Le tableau suivant indique, pour chaque qualité de fer :

1^e La charge minima que doit supporter une éprouvette quelconque isolée et la charge moyenne exigée pour l'ensemble des éprouvettes afférentes à un même lot ;

2^e L'allongement minimum que doit présenter une éprouvette quelconque isolée après rupture, et l'allongement moyen exigé pour l'ensemble des éprouvettes afférentes à un même lot.

DÉSIGNATION DES FERS.	CHARGES EN KILOG.		ALLONGEMENTS	
	pour 1 m/m ² de la section primitive		pour % relevés sur une long. calibrée de 0°200.	
	minima.	moyennes.	minimum	moyens.
Fer spécial à rivets ou fer de Suède... R	28 kg.	30 kg.	30 %	32 %
Fer de 1 ^{re} qualité ou fer fin au bois... B	35 »	37 »	20 »	23 »
Id. 2 ^e d ^o ou fer fort supér... S	34 »	36 »	15 »	18 »
Id. 3 ^e d ^o ou fer fort..... F	32 »	35 »	12 »	15 »
Id. 4 ^e d ^o ou fer ordinaire ... O	30 »	33 »	10 »	12 »

Epreuve de soudabilité. — Pour éprouver la soudabilité et la permanence de la texture du fer malgré l'action de la chaleur, les barres choisies pour l'essai de soudabilité, qui se trouvent déjà ou qui ont été ramenées, s'il y a lieu, à section convenable, comme il est dit ci-dessus pour les éprouvettes non soudées, seront tronçonnées en leur milieu et les morceaux réunis bout à bout par une soudure dite par amorce et à chaude portée.

L'amorce sera préparée avec un renflement amené par étirage ou par refoulement et donnant, autour de la soudure, un excès de matière permettant de corroyer le métal.

Chaque soudure devra être obtenue au moyen de trois chaudes, soit une chaude suante, une chaude de ressuée et une chaude de parage.

Ces soudures devront, dans chaque cas, être comprises entre les points de repère servant à mesurer l'allongement.

Ne seront pas soumis à l'essai de soudabilité :

- 1^o Les fers plats de 9 millimètres d'épaisseur et au-dessous ;
- 2^o Les fers carrés et les fers ronds ou demi ronds dont la section est inférieure à 200 millimètres carrés.

Ces éprouvettes avec soudure ne doivent pas donner des résultats inférieurs de plus de 5 % pour la résistance, et de 25 % pour l'allongement, aux conditions exigées pour les éprouvettes prises dans les corps des barres des mêmes fers, et indiquées au tableau ci-dessus.

TOLES DE FER

A. EPREUVES A FROID

La Compagnie de l'Est admet cinq qualités de tôles de fer.

Tôles communes correspondant à la marque T, n° 2.		
Tôles ordinaires	d°	TO, n° 4.
Tôles supérieures raides	d°	TS, n° 5.
Tôles supérieures douces	d°	TSS, n° 6.
Tôles fines	d°	TF, n° 7.

1^o *Epreuve de poinçonnage.* — Deux morceaux, ayant chacun 300 millimètres environ de longueur sur 72 millimètres de largeur et découpés, l'un suivant le sens du laminage, l'autre dans le sens perpendiculaire.

Les essais au poinçonnage sont effectués dans le sens du laminage et dans le sens perpendiculaire.

Les bandes auront une largeur de 72 millimètres et seront de longueur suffisante pour être percées à froid, au poinçon, de trois trous distants entre eux de 68 millimètres pris de centre en centre. Ces trous seront successivement élargis à froid par le passage de mandrins, augmentant de 1 millimètre de diamètre par centimètre de hauteur, jusqu'à ce que l'élargissement de chaque trou, commencé au diamètre initial fixé aux tableaux suivants, atteigne au diamètre maximum également fixé ci-après. On commencera l'élargissement par le trou du milieu.

Il ne devra se produire pendant l'essai, ni criques, ni gerçures, ni dessoudures.

2^o *Epreuve de pliage.* — Deux morceaux ayant chacun 300 millimètres environ de longueur sur 72 millimètres de largeur et découpés, l'un suivant le sens du laminage, l'autre dans le sens perpendiculaire.

Les essais de pliage à froid seront faits dans les conditions fixées aux tableaux ci-après, sur des bandes ayant une largeur de 72 millimètres et 300 millimètres environ de longueur. Les arêtes de la bande pourront être légèrement arrondies à la lime. Après essai, les bandes ne devront présenter ni fentes, ni criques, ni dessoudures, ni défaut quelconque.

Les redressements se feront, autant que possible, à la presse, et de façon à ramener la tôle dans le plan primitif.

B. EPREUVES À CHAUD.

1^o *Epreuve de pliage.* — Deux morceaux ayant chacun 300 millimètres environ de longueur sur 72 millimètres de largeur et découpés, l'un suivant le sens du laminage, l'autre dans le sens perpendiculaire.

Les éprouvettes pour essai à chaud sont portées à une température variable entre le rouge cerise et le rouge clair.

Les essais de pliage à chaud seront faits dans les conditions fixées aux tableaux ci-après, sur des bandes ayant une largeur de 72 millimètres et 300 millimètres environ de longueur. Après essais, les bandes ne devront présenter ni fentes, ni criques, ni dessoudures, ni défaut quelconque.

Les redressements se feront, autant que possible, au pilon, et de façon à ramener la tôle dans le plan primitif ;

2^o *Epreuve de cintrage ou d'emboutis.* — Les essais de cintrages et d'emboutissages seront exécutés dans des morceaux de dimensions convenables,

indiqués par les tableaux ci-après, pour obtenir les cylindres ou les calottes sphériques dont les dimensions sont indiquées dans les mêmes tableaux.

Ces essais n'auront lieu, autant que l'épaisseur le permettra, qu'avec des maillets en bois ; l'essai au pilon est exclu.

La tôle ne devra présenter, après les essais, ni fentes, ni gerçures, ni dessoudures.

C. EPREUVES PAR TRACTION

Deux barreaux ayant les dimensions indiquées ci-dessous et découpés, l'un suivant le sens du laminage, l'autre dans le sens perpendiculaire.

Les barreaux d'essais seront découpés à la cisaille, autant que possible, dans les feuilles les moins soignées. Ils seront prélevés au choix de l'agent réceptionnaire et aux emplacements désignés par lui.

Le dressage des bandes ou morceaux pourra être fait à chaud, mais le façonnage des barreaux d'épreuve, dans ces bandes, sera effectué entièrement à froid, sans aucun travail de chauffage, de martelage, de trempe, ni de recuit ultérieur.

Les allongements seront relevés d'après des distances entre repères fixées comme suit :

SÉRIES DES ÉPAISSEURS.	DISTANCE entre repères.	PARTIE CALIBRÉE		OBSERVATIONS
		Largeur.	Longueur.	
De 3 m/m à 5 m/m ..	100 m/m			
De 5 1/2 à 11 m/m ..	130 »			
De 11 1/2 à 17 m/m ..	170 »	20 m/m	200 m/m	
De 17 1/2 à 23 m/m ..	200 »			
De 23 1/2 à 29 m/m ..	280 »	30 m/m	300 m/m	
De 29 1/2 et au-dessus..	300 »			Le groupement en séries d'épaisseurs a été établi avec mêmes largeurs et mêmes longueurs calibrées, pour permettre la préparation des barreaux en paquet par mortaisage ou rabotage.

Les repères sont pointés à partir de la naissance des congés, à gauche et à droite de la partie calibrée, de façon que l'endroit de rupture soit toujours compris entre deux repères.

Aucun coup de lime ne sera donné sur les faces laminées des barreaux, qui resteront dans l'état où le laminage aura amené la surface de la tôle.

Ces barreaux seront soumis à des efforts de traction croissant jusqu'à la rupture.

Les tableaux ci-après indiquent, pour chaque qualité de tôle et pour chaque série d'épaisseurs, soit dans le sens, soit dans le travers du laminage :

1^o La charge minima que doit supporter une éprouvette quelconque isolée reconnue saine, et la charge moyenne exigée pour l'ensemble des éprouvettes afférentes à un lot d'une même catégorie d'épaisseurs ;

2^o L'allongement minimum correspondant que doit présenter une éprouvette quelconque isolée après rupture, et l'allongement moyen exigé pour l'ensemble des éprouvettes afférentes à un lot d'une même catégorie d'épaisseurs ;

3^o Le total minimum qu'on doit toujours obtenir en additionnant le chiffre de la résistance avec le chiffre de l'allongement, étant entendu que, dans chaque épreuve, la diminution d'un résultat dans la limite indiquée, sera compensée par une augmentation de l'autre résultat.

On ne pourra pas établir de moyenne entre les résultats fournis dans un sens ou dans l'autre, et il ne sera pas admis de tolérances au-dessous des chiffres fixés, autres que celles indiquées.

Confection d'un cylindre.
ayant pour hauteur
et pour diamètre intérieur
25 fois l'épaisseur e.

1 essai
sur 75 feuilles
ou fraction
d'au moins
30 feuilles.

Nombre minimum d'essais au compte du fournisseur.

Tôles non soumises à la pression de la vapeur.

1 essai sur 30 feuilles ou fraction d'au moins 8 feuilles.....

1 essai sur 20 feuilles ou fraction d'au moins 8 feuilles.....

1 essai sur 60 feuilles ou fraction d'au moins 25 feuilles.

DÉSIGNATION des SÉRIES d'ÉPAISSEURS. T O N° 4. Tôles ordinaires.	ÉPREUVES A FROID										ÉPREUVES A CHAUD														
	ESSAIS PAR TRACTION					PUNÇONNAGE					PLIAGES					PREMIERS PLIAGES					DEUXIÈMES PLIAGES				
	SENS DU LAMINAGE		TRAVERS DU LAMINAGE			DIAMÈTRES		ANGLES INTÉRIEURS		ANGLES INTÉRIEURS		Sens		Travers		Sens		Travers		Sens		Travers			
	Résistance par m ² /kg	Allongement par %	Sens du laminage	Travers du laminage	Sens du laminage	Travers du laminage	Sens du laminage	Travers du laminage	Sens du laminage	Travers du laminage	Sens du laminage	Travers du laminage													
de 3 mm à 5 mm inclus.	K	X	32	35	5	7	42	29	32	4	5	37	Néant.	90°	120°	θ e	Mail	30°	70°	2 e	Mail	Angles intérieurs ou trou d'emboutis.			
de 5 exclu à 8 inclus.	32	35	5	6,5	41,5	29	32	3,5	4,5	36,5	d°	100°	130°	θ e	d°	50°	V	80°	2 e	Mail	Angles intérieurs ou trou d'emboutis.				
de 8 exclu à 11 inclus.	32	35	5	6,5	41,5	29	32	3,5	4,5	36,5	d°	120°	140°	θ e	d°	70°	V	100°	2 e	Mail	Angles intérieurs ou trou d'emboutis.				
de 11 exclu à 14 inclus.	31	34	4,5	6	40	29	32	3	4	36	d°	140°	160°	θ e	d°	80°	V	120°	2 e	Mail	Angles intérieurs ou trou d'emboutis.				
de 14 exclu à 17 inclus.	30	33	4	5,5	38,5	28	31	2,5	3,5	34,5	d°	150°	170°	θ e	d°	90°	V	130°	2 e	Mail	Angles intérieurs ou trou d'emboutis.				
de 17 exclu à 20 inclus.	30	33	4	5,5	38,5	28	31	2,5	3,5	34,5	d°	160°	180°	θ e	d°	100°	V	140°	2 e	Mail	Angles intérieurs ou trou d'emboutis.				
de 20 exclu et au-delà.	30	33	4	5,5	38,5	28	31	2,5	3,5	34,5	d°	170°	190°	θ e	d°	110°	V	150°	2 e	Mail	Angles intérieurs ou trou d'emboutis.				

TOLES EN ACIER DOUX

ESSAIS.

Chaque essai se compose :

- | | | | |
|----------------|---|---|------------------------------|
| 1 ^o | D'une épreuve de pliage à froid | { | sens et travers de laminage. |
| 2 ^o | Id. id. à chaud | | |
| 3 ^o | Id. par traction (sens et travers du laminage). | | |
| 4 ^o | Id. d'emboutissage. | | |

A cet effet, les feuilles ne pourront être présentées en réception dans les usines qu'avec un excédent adhérent à la feuille, de dimensions suffisantes pour prélever les essais ci-dessus, dont les divers morceaux seront désignés par l'agent réceptionnaire à son choix et découpés sous ses yeux.

Épreuve de pliage à froid. — Les épreuves de pliage à froid seront faites sur 2 bandes ayant une largeur de 0^m070 et 0^m300 environ de longueur, prélevées, l'une dans le sens de la longueur de la tôle et l'autre dans le sens de la largeur.

Le prélèvement de ces bandes sera fait à froid au moyen de la tranche, et ce travail ne devra produire aucun éclat sur les bords des parties découpées.

Pour les tôles de 3 millimètres d'épaisseur et au-dessous, chacune des bandes sera pliée par le milieu jusqu'à ce que les deux parties viennent s'appliquer à bloc l'une sur l'autre dans toute leur longueur.

Pour les tôles de 3 millimètres 1/2 et au-dessus, le pliage devra former un angle de 50°, le rayon de raccordement à l'intérieur des deux branches étant égal à 3 fois l'épaisseur de la tôle. La bande sera ensuite complètement redressée.

Après ces essais, les bandes ne devront présenter, ni fentes, ni criques, ni défauts quelconques.

Épreuve de pliage à chaud avec redressement. — Les épreuves de pliage à chaud seront faites sur 2 bandes ayant une largeur de 0^m070 et 0^m300 environ de longueur, prélevées comme il est dit ci-dessus.

Pour les tôles de 3 millimètres et au-dessous, chacune de ces bandes, après avoir été chauffée à une température suffisante, sera pliée par le milieu, de manière à ramener les 2 parties parallèles l'une à l'autre, en laissant entre elles un intervalle égal à l'épaisseur de la tôle essayée, puis les bandes seront redressées à 180°.

Pour les épaisseurs au-dessus de 3 millimètres, l'angle du pliage sera de 20° ; le rayon de raccordement des 2 branches étant égal à l'épaisseur de la tôle essayée. Les bandes seront complètement redressées, puis pliées à nouveau jusqu'à

ce que les deux parties forment un angle de 60° , le rayon de raccordement étant le même que pour le premier pliage à chaud.

Après ces essais, les bandes ne devront présenter ni fentes, ni criques, ni dédoublures, ni défauts quelconques.

Épreuves par traction. — Les bandes d'essais seront découpées à froid, sans aucun autre travail de chauffage, de martelage, de trempe, ni de recuit ultérieur.

Elles seront prélevées au choix de l'agent réceptionnaire et aux emplacements désignés par lui..

Les allongements seront relevés d'après des distances entre repères fixées comme suit :

SÉRIE DES ÉPAISSEURS.	DISTANCE entre repères.	PARTIE CALIBRÉE		OBSERVATIONS
		LARGEUR.	LONGUEUR.	
5 m/m et au-dessous ...	100 m/m			
5 1/2 à 11 m/m	130 »			
11 1/2 à 17 m/m	170 »	20 m/m	200 m/m	
17 1/2 à 23 m/m	200 »			
23 1/2 à 29 m/m	280 »	30 m/m	300 m/m	
29 1/2 et au-dessus	300 »			

Les repères sont pointés à partir de la naissance des congés, à gauche et à droite de la partie calibrée, de façon que l'endroit de rupture soit toujours compris entre deux repères.

Aucun coup de lime ne sera donné sur les faces laminées des barreaux, qui resteront dans l'état où le laminage aura amené la surface de la tôle.

Ces barreaux seront soumis à des efforts de traction croissant jusqu'à la rupture.

La charge maxima de rupture et l'allongement correspondant minimum après rupture doivent correspondre, pour le sens du laminage comme pour le travers, aux indications ci-après :

Tôles de 3 millim. d'épaisseur $\left\{ \begin{array}{l} 42^{\text{e}} \text{ de résistance maxima par millimètre carré} \\ \text{de section initiale.} \\ \text{et } 25\% \text{ d'allongement minimum entre les repères} \\ \text{pointés.} \end{array} \right.$

Pour les tôles au-dessous de 3 millimètres, la Compagnie se réserve, s'il y a lieu, le droit d'effectuer dans les ateliers des fournisseurs ou dans les siens, des épreuves par traction, afin de s'assurer de la qualité des matières employées dans la fabrication.

Épreuves d'emboutissage. — L'épreuve d'emboutissage sera exécutée avec la massette en bois, dans un morceau de tôle de dimensions convenables pour obtenir, selon le cas, l'une des calottes sphériques indiquées par les croquis ci-dessous.

Toiles de 3 m/m et au-dessus



e : épaisseur de la tôle.

Au-dessus de 3 m/m



e : épaisseur de la tôle.

La tôle ne devra présenter, après l'essai, ni fente, ni crique, ni défaut quelconque.

Remarques. — On voit que la Compagnie des chemins de fer de l'Est :

1^o Fait varier la longueur entre repères des éprouvettes suivant leur section, de manière à entrer autant que possible dans la loi de similitude de M. Barba, dont je parlerai plus loin ;

2^o Pour les tôles communes, les charges de rupture et les allongements sont constants, quelle soit l'épaisseur de la tôle ;

3^o Pour toutes les autres qualités de tôles, les résistances et les allongements diminuent avec les épaisseurs du métal, et les angles intérieurs obtenus pour les pliages à froid ou à chaud, vont, au contraire, en augmentant avec les épaisseurs.

Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest

Emploi des tôles dans la construction du matériel

TOLES EN FER

Les tôles employées dans la construction du matériel roulant de la Compagnie de l'Ouest sont de quatre qualités, savoir :

Tôle de qualité commune, correspondant à la qualité dite N° 3 du Creusot.

Tôle de qualité ordinaire	d°	N° 4	d°
---------------------------	----	------	----

Tôle de qualité supérieure,	d°	N° 5	d°
-----------------------------	----	------	----

Tôle de qualité extra-douce,	d°	N° 6	d°
------------------------------	----	------	----

Pour s'assurer de la qualité, on fait sur deux échantillons prélevés à froid, l'un en long, l'autre en travers, sur chaque tôle pour les qualités 5 et 6, et sur une tôle par lot de 10 tôles, pour les qualités 3 et 4, des essais à la traction qui doivent donner les résultats suivants :

DÉSIGNATION DES TOLES	CHARGE DE RUPTURE par millimètre carré de la section initiale.	ALLONGEM. MESURÉ dans le décimètre comprenant le point de rupture.
Tôles de qualité commune N° 3.....	30 k.	5 m/m
Tôles de qualité ordinaire N° 4.....	32 k.	9 m/m
Tôles de qualité supérieure N° 5.....	33 k.	12 m/m
Tôles de qualité extra douce N° 6.....	35 k.	16 m/m

Toutefois, il est admis une tolérance de 2 kilogrammes au moins sur chacune des charges de rupture prescrites ci-dessus, à la condition que chaque kilogramme en moins soit compensé respectivement par un pour cent d'allongement, en plus de l'allongement normal prescrit.

De même, il est admis une tolérance de deux pour cent (2 %) en moins sur chacun des allongements prescrits ci-dessus, à la condition que chaque centième en moins soit compensé respectivement par un (1) kilogramme de charge de rupture, en plus de la charge normale prescrite.

L'éprouvette a 200 millimètres de longueur utile et une section carrée pour les tôles de 25 millimètres d'épaisseur et au-dessus ; pour les tôles dont l'épaisseur est inférieure à 25 millimètres, la section est rectangulaire, ayant comme dimensions l'épaisseur de la tôle et 25 millimètres de largeur.

Indépendamment des essais à la traction, on fait, en vue de se rendre compte de l'homogénéité et de la ductilité du métal, les épreuves suivantes :

Poinçonnage. — Deux bandes de tôles de 200 millimètres de longueur et 60 millimètres de largeur, prélevées à froid, l'une en long, l'autre en travers, sont percées en leur centre, d'un trou de 21 millimètres de diamètre ; le diamètre de ce trou doit pouvoir être agrandi à froid au moyen d'un mandrin conique jusqu'à :

23 millimètres pour les tôles de qualité commune	ou N° 3.
24 d°	d° qualité ordinaire ou N° 4.
25 d°	d° qualité supérieure ou N° 5.
30 d°	d° qualité extra-douce ou N° 6.

sans qu'il se manifeste ni criques, ni gerçures, ni dessoudures.

Pliage. — Des bandes de 300 millimètres de longueur et 60 millimètres de largeur prélevées dans les deux sens de la tôle, doivent pouvoir être pliées comme il est dit ci-après, sans qu'il se produise ni criques, ni gercures, ni dessoudures.

DÉSIGNATION des tôles.	CONDITIONS DU PLIAGE	
	à froid.	à chaud.
 	<p>Tôle de qualité commune.</p> <p>Sous un angle de 150° avec un arrondi d'un rayon intérieur égal au double de l'épaisseur de la tôle.</p>	<p>D'équerre, avec un arrondi d'un rayon intérieur égal au triple de l'épaisseur de la tôle.</p>
	<p>Tôle de qualité ordinaire.</p> <p>Sous un angle de 120° avec un arrondi d'un rayon intérieur égal au double de l'épaisseur de la tôle.</p>	<p>D'équerre, avec un arrondi d'un rayon intérieur égal au double de l'épaisseur de la tôle.</p>
	<p>Tôle de qualité supérieure.</p> <p>D'équerre, avec un arrondi d'un rayon égal au double de l'épaisseur de la tôle.</p>	<p>Sur elle-même, avec un écartement des branches égal au double de l'épaisseur de la tôle.</p>
	<p>Tôle de qualité extra-douce.</p> <p>D'équerre, avec un arrondi d'un rayon égal à l'épaisseur de la tôle.</p>	<p>Complètement sur elle-même.</p>

TOLES D'ACIER

Pour des chaudières en tôles d'acier, construites en 1884 par les anciens établissements Cail, on a imposé les conditions suivantes : une charge de rupture de 40 à 45 kilogrammes par millimètre carré et un allongement de 25 % au minimum (éprouvette de 200 millimètres). En outre, les tôles, trempées au rouge cerise sombre visible dans l'atelier, devaient pouvoir être pliées à bloc, sans criques ni indices de rupture. Enfin, les tôles devaient être recuites après chaque opération.

Les rivets étaient en fer.

Les tôles d'acier sont également employées pour certaines pièces, par exemple :

Pour les longerons et les pla- } tôles donnant aux essais 50k. et 20 %./. ques de renfort. } d'allongement avec tolérance de 2k. et 2 %./..

Pour les bandes de sommiers } tôles donnant 50 k. au minimum et 20 %.
de foyer. } d'allongement au maximum.

L'acier est en outre employé pour toutes les tôles jusqu'à 10 millimètres d'épaisseur inclusivement.

Les conditions imposées à ces tôles sont les suivantes :

Tôles au-dessous de 2 millimètres	47 kilogrammes et 10 %
Tôles de 2 à 6 millimètres	45 » 15 %
Tôles de 6 à 10 millimètres	43 » 21 %

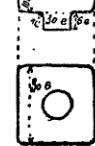
avec une tolérance de 2 kilogrammes en moins sur les charges, compensés par 2 % en plus sur les allongements.

Ces tôles sont en outre soumises aux épreuves ci-après :

Épreuves à chaud. -- On exécute une calotte hémisphérique avec bord plat, ayant les dimensions du croquis ci-contre.



Pour les tôles de plus de 5 millimètres d'épaisseur, on exécute en outre une cuve à base carrée ayant les dimensions ci-contre.



Ces pièces ne doivent présenter ni criques, ni gerçures.

Essais de trempe. — Des barreaux de 23 centimètres de longueur sur 4 centimètres de largeur, découpés dans chaque feuille en long et en travers, sont chauffés au rouge cerise un peu sombre, puis trempés dans l'eau à 20°; ils doivent pouvoir, sous l'action de la presse, se plier : complètement, de manière que les deux moitiés soient appliquées l'une sur l'autre, pour les tôles jusqu'à 4 millimètres d'épaisseur ; et avec un rayon qui ne doit pas être supérieur à l'épaisseur de la tôle, pour les tôles au-dessus de 4 millimètres d'épaisseur.



Compagnie des Chemins de fer du Nord

Cette Compagnie soumet les tôles de fer, nécessaires à ses différents services, à des épreuves à froid et à chaud.

ÉPREUVES A FROID

Ces épreuves consistent :

1° — à déterminer la résistance à la rupture par traction, ainsi que la faculté d'allongement tant dans le sens du laminage que dans le sens perpendiculaire.

2° — à contrôler ces épreuves de traction par le pliage de bandes découpées dans les tôles.

Dimensions des barreaux d'épreuves.

Les barreaux d'épreuve auront la forme de prismes à base rectangulaire, dont les dimensions seront, pour l'un des côtés, constamment 30 millimètres, pour l'autre l'épaisseur même de la tôle. Les résistances seront calculées sur cette section initiale. On ne devra en aucune façon toucher aux faces des barreaux, elles devront rester dans leur état primitif.

La longueur de la partie prismatique soumise à la traction sera toujours exactement de 10 centimètres (dix centimètres). Les allongements pour % seront calculés sur cette longueur initiale.

Ces barreaux, à leurs extrémités, présenteront une forme telle qu'ils puissent être saisis facilement par les mâchoires de la machine à essayer.

Ils seront soumis à des efforts de traction, croissant jusqu'à ce que la rupture ait lieu.

Dans le tableau suivant sont indiqués, par chaque catégorie, ainsi que pour le sens suivant lequel chaque barreau est découpé, les charges minima moyennes, ainsi que l'allongement minimum moyen exigés par l'ensemble des barreaux afférents à un même lot.

Aucun des chiffres obtenus aux essais ne devra descendre au-dessous de ces limites de plus de 3 kilogrammes, pour la charge de rupture, et 2 % pour l'allongement.

Il se pourra que, pour les tôles N° 7, la résistance à la rupture soit inférieure à celle exigée, mais compensée par un excédent d'allongement. La tolérance sera de 3 kilogrammes avec surcroît d'allongement de 1,5 % par kilogramme, au moins.

Le nombre des barreaux à essayer pour obtenir ces moyennes sera fixé par l'Agent de la Compagnie chargé de la réception, suivant l'importance de la livraison et suivant le résultat des premiers essais. Il sera au minimum de quatre par livraison.

On ne pourra établir de moyenne entre les résultats obtenus dans un sens et ceux obtenus dans le sens perpendiculaire.

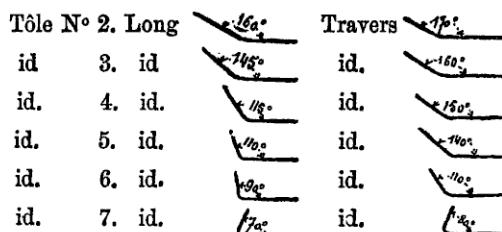
DÉSIGNATION DES CATÉGORIES	CHARGES DE RUPTURE en kilos pour 1 m/m ² de section initiale		ALLONGEMENTS correspondant à la charge de rupture (en fonction de la longueur soumise à l'essai.)	
	Long.	Travers.	Long.	Travers.
Tôle N° 2	30	27	5	2
» 3	31	29	7	4
« 4	32	30	12	8
» 5	33	30	17	9
» 6	35	32	19	12
» 7	37	34	25	20

Epreuves de pliage à froid. — Des bandes seront découpées dans les deux sens sur les tôles déjà choisies pour les essais de traction.

Ces bandes auront 40 à 50 millimètres de largeur, et l'on aura soin d'abattre à la meule ou à la lime les angles formés par les arêtes.

Elles seront pincées par l'une de leurs extrémités dans un étau, et l'on frappera avec un marteau sur l'extrémité libre. On s'arrêtera au moment où apparaîtront les premières criques.

La valeur des angles que l'on devra obtenir avant l'apparition des criques est indiquée ci-dessous :



ÉPREUVES A CHAUD

La température à laquelle seront faites ces épreuves sera voisine du rouge cerise. Elles consisteront :

1° — à exécuter avec des morceaux de dimensions convenables provenant des tôles déjà soumises aux précédents essais, soit des cylindres, soit des calottes sphériques à bord plat conservé dans le plan primitif de la tôle.

2° — à plier des bandes découpées dans ces mêmes tôles.

Confection des cylindres. — Ce genre d'épreuves s'appliquera aux tôles N° 3.

Les cylindres devront avoir pour hauteur et pour diamètre intérieur 25 fois (vingt-cinq fois) l'épaisseur de la tôle.

L'enroulement se fera avec un mandrin et au maillet en bois.
Le cylindre terminé ne devra présenter ni criques, ni gerces.

Confection des calottes sphériques. — Ce genre d'épreuves s'appliquera aux tôles n°s 4, 5, 6, 7.

La corde de la calotte mesurée intérieurement devra avoir constamment 30 fois (trente fois) l'épaisseur de la tôle.

Le bord plat circulaire de cette pièce aura pour largeur sept fois l'épaisseur de la tôle, et sera raccordé à la partie sphérique par un congé dont le rayon, mesuré intérieurement, sera égal à l'épaisseur de la tôle.

La flèche que devra avoir la calotte sera :

pour la tôle n° 4,		5 fois l'épaisseur de la tôle,	
d°	5,	10	d°
d°	6.	12	d°
d°	7,	15	d°

La calotte terminée ne devra présenter ni criques ni gerces.

Elle sera exécutée avec soin, en plusieurs chaudes si cela est nécessaire, et l'on se servira pour la défoncer de maillets en bois.

Confection d'une cuve. — Outre les épreuves précédentes, les tôles n° 7 seulement seront soumises à la suivante :

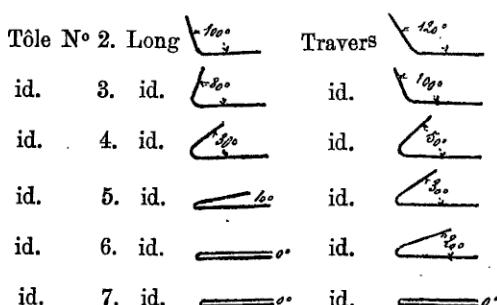
Il sera confectionné, avec un morceau de dimensions convenables, une cuve à base carrée et à bords relevés d'équerre. Le fond de cette cuve aura pour côté trente fois l'épaisseur de la tôle, et la hauteur des bords, mesurée intérieurement, sera de sept fois cette même épaisseur.

Les bords seront raccordés entre eux et avec le fond par un congé, dont le rayon mesuré intérieurement sera égal à l'épaisseur de la tôle.

La cuve terminée ne devra présenter ni criques, ni gerces.

Épreuves de pliage. — Des bandes seront découpées dans les deux sens sur les tôles à essayer. Elles seront établies dans les mêmes conditions que celles destinées aux épreuves à froid, et l'essai se fera de la même façon.

La valeur des angles que l'on devra obtenir avant l'apparition des criques est indiquée ci-dessous.



Compagnie des Chemins de fer de Paris-Lyon-Méditerranée

Les cahiers des charges de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée, pour les fers de forge, tôles de fer et tôles d'acier, sont des plus complets et des mieux étudiés, mais comme ils offrent une grande analogie pour les différents essais avec ceux déjà cités, je n'insisterai que sur quelques différences intéressantes à signaler.

Barreaux d'épreuves. — La longueur franche de la partie prismatique ou cylindrique, soumise à la traction, doit être d'au moins 0^m,200. La section du prisme ou du cylindre doit être, au minimum, de 500 millimètres carrés, à moins que l'échantillon à essayer n'ait une section inférieure à ce minimum, auquel cas la section doit être liée à la longueur par la formule $l^2 = 80 S$.

Soudabilité. — Cet essai s'opère comme dans les autres Compagnies, mais la Compagnie du P.-L.-M. exige que, pour la résistance et l'allongement, les résultats obtenus avec les barreaux soudés soient équivalents, à moins de 5 % près aux résultats exigés pour les fers de même catégorie non soudés.

Qualités des fers. — Le tableau ci-dessous indique les conditions de charge et d'allongement imposées aux différentes qualités de fers.

DÉSIGNATION DES FERS.	CHARGES EN KILOGRAMMES pour un millimètre carré de la section primitive			ALLONGEMENTS en fonction de la longueur du prisme essayé	
	initiales.	minima.	moyennes	minimum	moyens.
Fer de 1 ^{re} catégorie : fer fin ou au bois	31	35	38	0.220	0.250
Fer de 2 ^e catégorie : fer fort supérieur	30	34	37	0.200	0.230
Fer de 3 ^e catégorie : fer fort	28	32	35	0.150	0.180
Fer de 4 ^e catégorie : fer ordinaire ...	26	30	33	0.100	0.120

Conditions spéciales pour les tôles.

Les tôles de fer sont classées au point de vue de la qualité du fer en quatre catégories, devant satisfaire aux conditions suivantes :

DÉSIGNATION DES TÔLES.	CHARGES EN KILOGRAMMES pour un millimètre carré de la section primitive.				ALLONGEM. en fonction de la longueur du prisme essayé	
	Initiales		Minima.	Moyennes.	Minimum.	Moyens
	en long.	en travers.				
Tôle de 1 ^{re} catégorie : fine au bois ...	32	25	28	36.5	0.080	0.130
Tôle de 2 ^e catégorie : fine à la houille.	30	24	27	33.5	0.050	0.085
Tôle de 3 ^e catégorie : tôle à chaudières	27	21	24	30.0	0.015	0.055
Tôle de 4 ^e catégorie : tôle puddlée ...	25	20	22	27.0	0.010	0.045

Tôles d'acier. — Dans la réception de ces matières nous ne pouvons signaler, pour les tôles à chaudières, que la condition imposée de pouvoir plier en deux à plat les barreaux d'essais après trempe, de manière que les deux moitiés soient complètement appliquées l'une sur l'autre.

Compagnie des Chemins de fer de Paris à Orléans

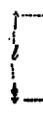
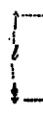
Cette Compagnie, dans son nouveau cahier des charges de 1887, semble avoir abandonné assez généralement les essais physiques à froid ou à chaud, et ne procède à ses réceptions que par des essais de traction.

Éprouvettes. — Les éprouvettes d'essais doivent être découpées à froid dans les pièces, elles ont :

200 millimètres de longueur utile, 25 millimètres de largeur ou 16 millimètres de diamètre.

Cette Compagnie se préoccupe dans les essais à la traction, de la résistance R, de l'allongement A, et aussi de la striction S, et il faut que la somme de la résistance et de la striction, c'est-à-dire R + S, soit égale au chiffre marqué en face de chaque qualité du métal.

Les valeurs de R, A, S, marquées dans les tableaux sont des minimums.

DÉSIGNATION.	NOMBRES de catégories	QUALITÉ.	CONDITIONS GÉNÉRALES DE RÉCEPTION.				
			ESSAIS DE TRACTION.				Essais divers.
			Résistance par $\frac{kg}{mm^2}$	Allongement %	Striction %	Valeur de R+S	
 Fers ronds, carrés et plats avec épaisseur d'au moins $\frac{8}{m}$ ou $\frac{1}{8}$ de la largeur.  au moins $\frac{8}{m}$ ou $\frac{1}{8}$	1	fer commun..	32 k	6 à 8	18	50	
	2	fer laminé..	35 k	10 à 12	25	60	
	3	fer corroyé..	35 k	15 à 18	35	70	
	4	fer de ferraille	36 k	20	45	81	doit être très homogène.
	5	fer transformé dit fer fort.	38 k	20	50	88	d°
	6	fer à grain	40 k	23	60	100	d°

DÉSIGNATION	NOMBRES de catégories	QUALITÉ	CONDITIONS GÉNÉRALES de RÉCEPTION				
			ESSAIS DE TRACTION				ESSAIS DIVERS
			Résistance par $\frac{kg}{mm^2}$	Allongement %	Striction %	Valeur de R+S	
TÔLES de FER	1	fer commun (tôles puddlées)	32 k.	6 à 10	18	50	en long.
	2	fer corroyé	35.	12	23	58	en long { à remplacer par l'acier n° 2 sans pour les tôles minces
	3	fer fort	36	15	28	64	en long { à remplacer par l'acier n° 4
	4	fer fort supérieur	30	10	20	50	entravers { catote emboutie à 10 épaisseurs
	5	fer fin	35	16	30	65	en long { catote emboutie à 15 épaisseurs
	6	fer fin supérieur	35	16	30	65	en long { Epreuve de l'angle tridère croisé

DÉSIGNATION.	Numéros de catég.	QUALITÉ.	CONDITIONS GÉNÉRALES DE RÉCEPTION.				
			ESSAIS DE TRACTION.				ESSAIS DIVERS
			Résistance par kg/mm^2	Allongement % A	Striction % S	Valeur de R+S	
TÔLES D'ACIER.	1	Extra-doux. (Bessemer) Déphosphoration.	40k.	25	60	100	dans les 2 sens
	2	Très doux. (Martin).	40 à 45	25 à 20	60 à 55	100	d°
	3	Très doux. (Martin). Qualité de la marine.	42	26	63	105	d°
	4	Très doux. (Martin ou Bessemer)	45	20	50	95	d°
	5	Doux. (Martin).	45 à 50	25 à 20	50 à 45	95	d°
	6	Demi-doux. (Martin ou Bessemer)	50 à 55	20 à 16	45 à 40	95	d°

La Compagnie d'Orléans est donc la première en France qui fasse entrer la valeur de la striction dans ses réceptions de métaux ; cette tentative méritait d'être spécialement signalée.

Chemins de fer de l'Etat

Les cahiers des charges des chemins de fer de l'Etat offrent une particularité dans les essais à la traction ; on impose, en effet, une charge en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive comme limite d'élasticité, et, lorsque la section de l'éprouvette est inférieure à 500 millimètres carrés, on applique la formule $l^2 80 S$, pour lier la longueur à la section.

Les deux tableaux ci-dessous donnent les conditions d'élasticité, de résistance et d'allongement imposés aux fers et aux tôles.

DÉSIGNATION DES FERS.	CHARGE EN KILOS PAR m/m ² DE LA SECTION PRIMITIVE		ALLONGEMENT en fonction de la longueur du prisme essayé
	Limite d'élasticité.	Minima.	
Fer de 1 ^{re} catégorie.....	15	35	0.220
» 2 ^e »	15	34	0.200
» 3 ^e »	»	32	0.150
» 4 ^e »	»	30	0.100

POUR DES TÔLES DE :	CHARGES EN KILOGR. par m/m ² de la section initiale			ALLONGEMENT minimum en fonction de la long. du prisme	
	Limite d'élas- ticité. en long.	charge de rupture minima en long.	en travers.	en long.	en travers.
1 ^{re} catégorie : { Tôle fine au bois ou en fer fin au bois.....	15 k.	35 k.	34 k.	0.180	0.120
2 ^e catégorie : { Tôle fine à la houille ou en fer fort supérieur....	15	34	32	0.140	0.090
3 ^e catégorie : { Tôle à chaudière ou en fer fort.....	15	32	30	0.100	0.060
4 ^e catégorie : { Tôle puddlée ou en fer ordinaire.....	15	30	26	0.060	0.040
Tôles de longerons pour locomotives ou tenders.....	15	34	28	0.100	0.050

Soudabilité. — L'Etat admet que les fers soudés peuvent présenter des différences au moins de 5 à 10 % pour la résistance, et 10 à 25 % pour l'allongement, par rapport aux fers non soudés.

Pour les tôles de fer, l'Etat fait opérer aussi l'épreuve du poinçonnage à froid comme la Compagnie de l'Ouest.

Il n'y a aucune remarque intéressante à faire sur les autres épreuves usitées à froid ou à chaud.

Association des Propriétaires d'appareils à vapeur du Nord de la France

Depuis le mois d'octobre 1886, j'ai eu à m'occuper de la surveillance de la fabrication de chaudières en tôle d'acier ; j'ai donc dû rechercher les conditions qu'il fallait imposer lors de la réception de ces tôles, pour assurer l'exécution des prescriptions du cahier des charges.

Je crois devoir transcrire ici un extrait des traités :

« Les tôles d'acier devront être faites avec des lingots provenant exclusivement de métal basique fabriqué au four Martin-Siemens, à l'exclusion de tout métal provenant d'un convertisseur.

« Les tôles devront être faites exclusivement avec les parties inférieures des lingots ; à cet effet, on devra abattre la partie supérieure des lingots, et le poids ainsi enlevé devra être de 30 à 35 % du poids total du lingot primitif.

« La chute sera détachée du lingot à froid au marteau-pilon. L'aspect de la cassure de la partie destinée à faire les tôles sera examiné avec le plus grand soin, et on s'assurera qu'elle est absolument exempte de soufflures ou autres défauts.

« L'épaisseur de chaque lingot doit être au moins égale à 15 fois l'épaisseur de la tôle terminée.

« Les tôles d'acier seront livrées au constructeur après avoir subi, chez le fabricant, un recuit total après laminage.

« Le bulletin de livraison des tôles portera devant chaque tôle le numéro de la coulée et la composition chimique de chaque coulée.

« Toutes les tôles d'acier sans exception seront commandées par le constructeur 10 centimètres plus longues, de manière à ce qu'on puisse prélever au moins deux éprouvettes de traction, conformes au modèle de l'Association des Propriétaires d'appareils à vapeur, et une éprouvette pour le pliage après trempe.

« Les essais à la traction et au pliage seront faits par les soins de l'Association, et sur chaque tôle ; la confection des éprouvettes sera à la charge du constructeur.

« Aux essais à la traction, chaque tôle d'acier devra remplir les conditions suivantes :

« Essais sur les tôles au naturel après recuit chez le fabricant :
1^o — Résistance à la rupture maxima : 40 kilogrammes par millimètre carré ;
2^o — Allongement % sur 200 millimètres à la rupture, minimum : 30 %.

« Essais sur les tôles, les éprouvettes ayant été trempées dans l'eau à 28° après avoir été portées au rouge cerise :

- 1^o — Résistance à la rupture maxima : 47 kilogrammes par millimètre carré ;
- 2^o — Allongement % sur 200 millimètres à la rupture, minimum : 18 %.

« Les essais de pliage se feront sur des morceaux de tôle de 20 centimètres de longueur et 4 centimètres de largeur, après avoir été trempés comme il est dit ci-dessus ; ils devront pouvoir être repliés en deux, bord à bord, sans que sur le dos et les côtés latéraux paraisse aucune crique ou gerçure.

« Toute tôle qui ne remplirait pas ces conditions serait refusée.

« Pour la construction proprement dite, outre les soins tout particuliers avec lesquels la chaudière sera traitée, le constructeur devra, sous sa responsabilité, exécuter les prescriptions suivantes :

« Tous les trous de rivets pourront être poinçonnés sur tôle plate à 6 millimètres de moins que le diamètre définitif.

« Les tôles seront enroulées et les 6 millimètres restant enlevés à la mèche américaine, travaillant en une seule fois sur les deux tôles correspondantes.

« Aucune pièce ne pourra être rivée avant que le perçage ait été accepté par l'Association des Propriétaires d'appareils à vapeur.

« Tous les trous de communication, sur les communications, sur les bouilleurs et le corps cylindrique, seront percés à la mèche ; le bédane est absolument prohibé.

« Les chausses partielles faites sur les tôles du corps cylindrique, pour faire coller les bords de la communication, sont prohibées. »

On remarquera que dans ces conditions nous admettons que la masselotte à faire tomber pour chaque lingot, et qui représente 30 à 35 % du poids total, se trouvera prise entièrement à la partie supérieure du lingot.

La Marine et l'Artillerie pour les aciers à tôles, profilés, ferrures, barres, exigent d'après leur cahier des charges du 1^{er} juillet 1887 :

« On utilisera seulement la partie moyenne de chaque lingot, on détachera à l'extrémité supérieure une chute, au moins égale à 28 % du poids total, et au pied une chute au moins égale à 4 %. MM. les Sous-Inspecteurs auront la faculté de réduire cette proportion, suivant que les procédés de fabrication conduiront à une diminution de retassure plus ou moins forte. »

Résumé

Texture des fers. — Les fers en général se classent d'après leur texture en fers à grains, ou à nerfs ou mixtes ; la texture n'a pas besoin d'autre définition, elle se reconnaît à la cassure.

Le *Grain* doit être uniforme, demi-fin, de couleur gris-plombé, il ne doit pas présenter de facettes brillantes et larges.

Le *Nerf* doit être blanc, sans éclat, délié et allongé, et devra présenter de petits crochets aux points de séparation, les fibres ne doivent être ni courtes ni noirâtres.

La texture des tôles de fer doit être à nerf fin parfaitement homogène.

But des épreuves. — Les épreuves à froid et à chaud ont pour but d'apprécier la ténacité, l'élasticité, l'homogénéité, la ductilité et la soudabilité du métal.

Ténacité et élasticité. — Ces deux qualités du métal sont constatées par des épreuves de traction à froid.

Il faut toutefois remarquer que les essais de traction, comme nous le verrons plus loin, peuvent donner des renseignements très exacts sur la ductilité du métal par l'examen des allongements linéaires et de la striction.

Homogénéité. — Pour constater l'homogénéité du métal, on détache un certain nombre de pièces, en les frappant en porte-à-faux sur une enclume avec un marteau à devant, après incisions au burin d'une partie de la section.

La cassure doit dénoter un fer parfaitement homogène à nerfs, ou à grains fins, ou mixte, d'après les indications de la soumission ou de la commande.

Soudabilité. — Pour éprouver si le fer se soude bien et si son grain ne change pas sensiblement sous l'action des chaude, on tronçonne un certain nombre de barres en leur milieu et on réunit ensuite les deux bouts de chaque barre par une bonne soudure ; après cette opération, on confectionne avec les barres, ainsi qu'il est dit plus haut, des barreaux d'épreuves contenant les soudures.

Ces barreaux, essayés à la traction, doivent donner, pour la résistance et l'allongement, des résultats équivalents à moins de cinq pour cent (5 %) près, aux résultats exigés pour les fers de même catégorie non soudés, d'après le cahier des charges de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée. La Compagnie de l'Etat accorde les écarts de 5 % pour la résistance et 25 % pour l'allongement.

Ductilité. — La ductilité du métal est éprouvée dans la pratique principalement par des épreuves à chaud ou à froid qui sont :

1^o Pour les fers de forge :

Epreuves des crochets ;

Epreuves des trous ;

Epreuves du rabattement ;

2^o Pour les tôles de fer :

Epreuves du pliage ;
Epreuves du cylindre ;
Epreuves de la calotte sphérique ;
Epreuves de la boîte à base carrée.

3^o Par des épreuves de traction à froid qui permettent d'étudier les allongements et la striction.

Pour les tôles de fer, on opère aussi à froid, pour se rendre compte de la ductilité, les opérations de :

Epreuves du poinçonnage ;
Epreuves du pliage.

Essais à la traction

Parmi les moyens d'investigations mis à la disposition des ingénieurs et des constructeurs, pour rechercher les qualités d'un métal, les essais à la traction tiennent certainement la première place.

Il est fort rare que l'on fasse subir à la matière les essais complets de traction, compression, flexion, chocs, forgeage, soudage, qui permettraient de se rendre un compte exact de toutes les qualités diverses que possède le fer ou l'acier en essai.

Un essai à la traction bien fait paraît suffire et remplace ces différentes épreuves ; il donne évidemment des renseignements très exacts sur l'élasticité, la ténacité et la ductilité qui sont les points essentiels à rechercher dans le travail des métaux, mais ne peut donner que de bien faibles indices sur la manière dont le métal se conduira sous l'action des chocs plus ou moins violents.

L'importance des épreuves de traction est telle que bien des usines et des auteurs ont pris, pour base de la classification des fers et des aciers, uniquement les résultats fournis par ces essais.

Nous croyons donc devoir étudier avec assez de détails les questions si complexes soulevées par les essais à la traction.

INFLUENCE DU MODE DE PRÉPARATION DES BARREAUX

Les résultats obtenus dans les essais à la traction sont influencés, non seulement par les formes et les dimensions des barreaux d'épreuve, mais aussi par

la manière dont ils sont prélevés dans les pièces, suivant qu'ils sont découpés aux machines-outils, ou forgés, ou laminés à chaud ou à froid.

Nous allons rechercher l'influence de certaines manières d'opérer dans la fabrication des éprouvettes.

Influence du cisaillage et du poinçonnage

Dans les tôles principalement, on enlève très souvent la bande de tôle, dans laquelle on prélevera les éprouvettes à l'aide de la cisaille de telle façon que les deux rives du métal ont été cisaillées ; il y a donc un assez grand intérêt à se rendre compte de l'influence de cet outil sur le métal.

EXPÉRIENCES DE M. BARBA (1). — Cet ingénieur a étudié cette question importante sur des tôles d'acier, il a conclu de ses expériences opérées sur des tôles de 7 millimètres à 12 millimètres d'épaisseur :

« 1^o Que les effets du poinçon et de la cisaille sont essentiellement locaux et ne s'étendent que sur une zone restreinte, d'une largeur inférieure à 1 millimètre sur les bords de la rive cisaillée ou du trou poinçonné ;

« 2^o Qu'aucune fente ou crique n'existe dans la partie altérée ;

« 3^o Que la trempe détruit les effets de la cisaille ou du poinçon, en ramenant le métal à l'état où il serait si la cisaille ou le poinçon avaient été remplacés par les machines à raboter ou à forer ;

« Que le recuit seul ou après trempe détruit, comme la trempe seule, les altérations de la cisaille et du poinçon. »

M. Barba explique ces résultats en admettant que la cisaille et le poinçon produisent, sur le métal soumis à leur action, une pression considérable mais toute locale, bien supérieure à la limite d'élasticité, qui fait comprendre la diminution ultime d'allongement à la rupture.

Mais, d'un autre côté, cette pression exagérée a provoqué la dissolution du carbone mélangé et produit, dans la partie du métal soumise à l'action des outils, une véritable trempe, ce qui expliquerait l'augmentation de dureté et de ténacité, c'est-à-dire de résistance à la rupture.

Sans discuter ces explications, le point principal à noter comme conséquence des essais de M. Barba, c'est que si nous enlevons à la machine-outil, sur les rives de nos barreaux d'épreuves, cisaillés ou poinçonnés, 1 millimètre à 2 millimètre de métal, la partie restante sera dans son état naturel et nullement soumise aux perturbations des opérations qu'elle aura supportées.

Le résultat sera le même si on recuit l'éprouvette après cisaillage ou poinçonnage.

1. Etude de l'emploi de l'acier dans les constructions, par J. Barba. — Paris, Baudry, 1874.

EXPÉRIENCES DE M. JOESSEL, INGÉNIEUR DE LA MARINE. — En 1872, M. Joëssel a publié des expériences les plus intéressantes sur les fers, les fontes et les aciers ; il a entrepris toute une série d'essais sur des bandes de tôles cisailées à différentes largeurs ; ce qui les avaient courbées en arc de cercle, elles ont été redressées ensuite les unes à chaud, les autres à froid.

Les tôles essayées étaient :

Tôle commune de 7 millimètres d'épaisseur.

Tôle ordinaire de 7 » »

Tôle supérieure de 5 » »

Tôle fine de 10 » »

Tôle en métal fondu de 18 millimètres réduite à 8 millimètres à la machine à raboter, provenant de Terre-Noire.

Tôle en métal fondu de 18 millimètres réduite à 8 millimètres, à la machine à raboter, provenant de l'usine de Terre-Noire.

Nous extrayons du tableau, publié par M. Joëssel, les chiffres des deux bandes extrêmes, la plus petite et la plus large.

DÉSIGNATION commerciale des tôles.	Largeur des bandes m/m	BANDES REDRESSÉES A CHAUD				BANDES REDRESSÉES A FROID			
		AU MAILLET				AU MARTEAU			
		Sens du laminage		Sens transversal		Sens du laminage		Sens transversal	
Tôle commune de 7 millim. d'épais- seur.	18	Résis- stances.	Al- longe- ments.	Résis- stances.	Al- longe- ments.	Résis- stances.	Al- longe- ments.	Résis- stances.	Al- longe- ments.
	43	40.17	5.83	36.52	3.41	43.82	3 »	43.82	2 »
Tôle ordinaire de 7 millim. d'épais- seur.	18	37.21	6.91	31 »	2.25	40.20	3.91	34 »	1.25
	43	33.91	7.16	32.19	2.83	39.12	3.50	37.79	2.91
Tôle supérieure de 5 millim. d'épais- seur.	18	34.65	16 »	29.06	3.83	33.14	5.75	29.83	2.33
	43	36.52	10.66	36.52	10.66	32.86	9 »	36.52	6.66
Tôle fine de 10 millim. d'épais- seur.	18	31.30	15.16	32.15	6.41	31.30	17.66	33.63	8.50
	43	38.66	24.50	34.69	6 »	43.80	12.50	38.34	4.16
Tôle en métal fondu de 18 millim. ré- duite à 8 millim. à la machine à raboter proven- tant de l'Usine de Terre-Noire.	18	46.83	20.80	46.51	21.58	52 »	11.80	53.18	10.80
	43	51.24	19.30	48.36	15.13	57.06	8.16	52.08	8.24
Tôle en métal fondu de 18 millim. ré- duite à 8 millim. à la machine à raboter proven- tant de l'Usine de Terre-Noire.	18	45.94	21.41	45.40	18.99	45.40	10.87	46.36	14.37
	43	47.93	21.83	48.61	17.33	54.41	8.29	47.93	7.66

« La cisaille, dit M. Joessel, a donné à toutes les bandes la même courbure.
 « Le martelage qu'elles ont subi représente donc le travail nécessaire pour les
 « redresser du même arc.

« Les bandes formaient six lots, composés chacun de six bandes de largeurs
 « croissantes de 5 en 5 millimètres depuis 18 millimètres jusqu'à 43 millimètres,
 « dans le but d'étudier l'effet du cisaillement sur les tôles. L'opinion commune
 « est que cette opération déchire leurs bords en y produisant de petites fentes
 « transversales, qui peuvent devenir plus tard, l'origine de ruptures. S'il en était

« ainsi, le cisaillement serait accusé par les résistances de rupture des bandes,
« qui devraient aller en diminuant, en même temps que leurs largeurs.

« Le tableau qui précède montre que c'est le contraire qui a lieu. Les résistances de rupture des bandes de chaque lot, à peu d'exceptions près, augmentent quand la largeur des bandes diminue, et *vice-versa* pour les allongements.
« Le même phénomène se présente pour les bandes martelées, comparées à celles qui ont été redressées à chaud, au maillet. La cisaille agit donc, dans cette circonstance, à la manière du marteau. C'est en comprimant fortement les tôles entre le couteau et le support fixe de la machine, qu'elle les affaiblit. Il en est de même du poinçon.

« Les fatigues que supportent les tôles, en les cisaillant, ou en les poinçonnant, augmentent, par suite, avec leur épaisseur. Un moyen de les diminuer consiste à répartir, sur une plus grande étendue, la pression des tôles sur leurs supports, au moment de l'opération. On obtient ce résultat, dans les machines à cisailler, en assujettissant fortement les tôles sur leurs supports, et, dans les machines à poinçonner, en augmentant le diamètre de la matrice, relativement à celui du poinçon. Ces conséquences sont vérifiées par les faits.

« Si on étudie maintenant, comparativement, les actions du cisaillement et du forgeage à froid sur des tôles de diverses natures, on remarque que les tôles douces sont moins affectées que les tôles aciéreuses par le forgeage, mais qu'elles le sont davantage par le cisaillement.

« Dans le tableau qui précède, la tôle supérieure de 5 millimètres se classe au premier rang par sa douceur. Ses éléments de rupture, à l'état naturel, peuvent être considérés comme étant ceux de la bande la plus large redressée à chaud, au maillet. Or, dans cette tôle, les allongements ont varié de 10,66 à 15,16 pour les bandes longitudinales redressées à chaud, et de 9,00 à 17,66 pour celles redressées à froid, lorsque leurs largeurs ont passé de 18 à 48 millimètres.

« Dans les mêmes circonstances, les allongements des tôles en métal fondu ont à peine varié.

« Quant aux résistances de rupture, elles ont peu changé dans l'un et dans l'autre cas, un peu plus cependant pour les tôles d'acier que pour les tôles de fer. Néanmoins, en prenant pour base les résistances vives de rupture, il ressort du tableau que ces dernières ont été relativement plus affaiblies par les cisaillements que les tôles d'acier.

« En comparant ensuite, pour chacun de ces métaux, les allongements des bandes longitudinales redressées à chaud, à ceux des mêmes bandes redressées à froid, on voit, au contraire, que pour la tôle douce, il n'y a pas eu de diminution sensible, tandis que pour les tôles d'acier, les diminutions se sont élevées jusqu'à 50 %. Les tôles d'acier ont donc beaucoup plus souffert par la déformation et le redressement à froid, que la tôle de fer.

« L'examen des autres tôles conduit à des appréciations analogues, et semble

« montrer que le degré d'épuration des matières intervient aussi dans les modifications que subissent les éléments de leur ténacité par le martelage, le pointonnage, le cisaillement et probablement les autres opérations mécaniques du même ordre. Les fers mal épurés paraissent se comporter, sous ce rapport, comme ceux qui sont imparfairement affinés, c'est-à-dire comme les aciers.

« Les conclusions que nous voulons recueillir de ces considérations, c'est que les fers, comme les aciers, sont affectés par les déformations à froid et qu'il importe de les éviter le plus possible, ou au moins de les faire suivre d'un recuit, de manière à remettre les molécules dans un état de tension uniforme.

Les expériences de M. Joëssel confirment donc les résultats obtenus par M. Barba.

M. Gallon, ingénieur de la marine, a publié un travail très intéressant en 1887 sur le même sujet.

Les conclusions de cet ingénieur étant absolument opposées à celles de ses deux collègues, je n'ai pas cru devoir en faire un simple résumé, et je reproduis l'extrait du rapport de M. Gallon qui accompagne la circulaire ministérielle du 2 Septembre 1887.

NOTE DE M. GALLON, INGÉNIEUR DE LA MARINE. — « *Influence du cisailage.* — Quand on cisaille une tôle, et qu'on la laisse oxyder, on remarque que le périmètre de la tôle s'est oxydé plus que la partie centrale. Si on examine de près cette oxydation du périmètre, on y trouve une série de stries parallèles, qui rappellent les ondulations produites par une pierre qui tombe dans l'eau. Ces stries sont causées par la lame de la cisaille qui refoule devant elle les molécules du métal, en modifiant la constitution de la tôle. La zone ainsi altérée forme une bande qui n'a pas moins de 5 centimètres de largeur. On a même eu occasion de remarquer à Guérigny un lot de tôle, dans lequel les stries provenant du cisailage et accusées par l'oxydation ultérieure, s'étendaient jusqu'à 7 ou 8 centimètres de la rive de la tôle. Il est clair qu'une barrette d'essai prise dans cette région peut donner des résultats insuffisants.

« *Bandé détachée par cisailage.* — Cette influence du cisailage que l'on vient d'analyser, se reproduit de la même façon sur la bande détachée de la tôle par la cisaille. En outre, elle s'aggrave sur cette bande par les phénomènes de torsion, qui sont presque nuls sur la tôle et qui sont extrêmement marqués sur la chute, surtout quand cette chute est étroite. Si, en effet, on détache d'une tôle une bande ayant 8 ou 10 centimètres de largeur, on trouve que cette bande est cintrée dans les deux sens; si même la largeur de la bande n'était que de 1 ou 2 centimètres, le cisailage lui ferait faire une ou deux révolutions par mètre, et on obtiendrait une espèce de tire-bouchon. Si donc on voulait soumettre à un essai de traction une bande étroite détachée par cisailage, on

« aurait de mauvais résultats, car le métal est profondément altéré; il a subi ce refoulement que nous avons indiqué plus haut, et en outre, en se cintrant dans les deux sens, il a pris une déformation permanente, indiquant que sa limite d'élasticité a été largement dépassée et que, par suite, ses qualités de résistance et d'allongement ont été déjà notablement diminuées. Si, en outre, ne tenant aucun compte de ces phénomènes, on redresse cette bande à froid sur un enclume, en la frappant à coups de marteau, on lui redonne une seconde déformation permanente en sens inverse de la première: on complète ainsi la destruction déjà commencée, et la barrette d'essai provenant d'une bande ainsi traitée ne peut donner que des résultats médiocres et qui doivent être rejetés.

« Il est donc essentiel de bien prendre les barrettes d'essai, et les fournisseurs n'y manquent jamais: quand ils s'engagent à livrer des tôles donnant 42 kilogrammes et 20 %, ils ne cherchent pas à faire mieux, aussi sachant que leurs tôles ne dépassent guère les conditions exigées, ils mettent un soin extrême à éviter que leurs barrettes d'épreuve subissent la moindre altération; et les résultats constatés en usine avec des barrettes aussi soignées, ne se reproduiront qu'à la condition qu'on fera toujours les essais de la même manière.

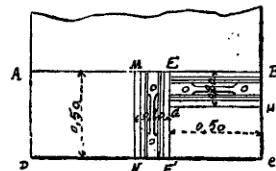
« D'après ces faits, le procédé suivant paraît être le meilleur à suivre dans le découpage des barrettes, et être celui qui concilie autant que possible la rapidité de l'opération, l'économie dans la consommation des tôles pour essai et la nécessité capitale de ne pas altérer le métal qui doit subir l'épreuve.

« *Barrettes de tôles.* — On se servira pour couper la tôle d'une cisaille dont le tablier, aussi long que possible, sera disposé de façon à pouvoir permettre de maintenir sur ce tablier, avec des presses en fer, les bandes de tôles qui doivent être découpées.

« On commence par détacher à un des bouts de la feuille, et dans le sens de sa longueur, une chute entière A B C D, ayant 50 centimètres de long, et qui fournira la barrette en long et la barrette en travers pour essais de traction ainsi que les barrettes de pliage pour essais de trempe, quand il y a lieu d'en faire.

« On trace sur la chute, avec un cordeau blanchi, les lignes MN, FE, GH placées aux distances indiquées sur le croquis ci-dessus; et on frappe le poinçon à ancre aux quatre points marqués sur le plan, en maintenant ce poinçon toujours dans la même direction. On remarquera que la direction de ce poinçon sera suffisante, quand les barrettes seront terminées, pour indiquer si elles ont été prises en long ou en travers.

« On refend la chute A B C D suivant la ligne E F, tracée à 50 centimètres de la rive B C; la partie A E F D, qui repose sur le tablier, a assez de surface pour qu'il soit inutile de la maintenir avec les presses. On reprend la par-



« tie E B C F qui vient de tomber, on saisit fortement avec des presses sur le tablier la partie E B H G qui, ayant à fournir la barrette, doit être maintenue absolument plane, et on fait tomber la chute G H C F, qui est conservée, pour le cas où on voudrait prendre une seconde barrette en travers.

« Le rectangle E B H G, enveloppe de la barrette, et qui a 20 centimètres de largeur, est alors ramené à la largeur de 10 centimètres par trois coups de cisaille de chaque côté, en ayant toujours grand soin de maintenir sur le tablier, avec des presses à main, la partie qui doit donner la barrette. Le premier coup de cisaille enlève une petite bande de 25 millimètres de largeur environ ; le deuxième coup, une bande de 15 millimètres, et le dernier coup une bande de 10 millimètres : ces bandes faisant en tout les 5 centimètres qui doivent être enlevés de chaque côté. La largeur décroissante des petites bandes cisaillées a comme effet, de diminuer l'antagonisme qui se produit, lors de l'attaque de la cisaille, entre les deux morceaux de tôle qui doivent être séparés : plus il y a d'écart entre la résistance des deux bandes en question, plus le grand morceau reste intact : le petit subit à lui seul les efforts de formation et de torsion.

« Avec ces précautions, qui sont suivies dans les grandes usines, et notamment au Creusot, où la fabrication des innombrables barrettes qu'il faut casser chaque jour est devenue une assez grosse question, parfaitement résolue, on arrive à obtenir des bandes absolument planes et qui n'ont subi aucune fatigue.

« *Insuffisance des cisailles des usines.* — Dans quelques usines les cisailles peuvent ne pas être suffisamment longues. Dans ce cas, si les cisailles ne se prêtent absolument pas à l'installation décrite plus haut, on tournera la difficulté en découpant dans la tôle les rectangles E B H G, M N F E, avec une poinçonneuse actionnant un poinçon méplat, qui agit à 8 ou 9 centimètres de l'arête future de la barrette finie, et dont l'action n'est pas trop dommageable ; la machine à raboter à froid aura seulement, dans ce cas, un peu plus d'ouvrage. »

Nous avons eu occasion de faire des milliers d'essais à la traction de tôles d'acier pour générateurs. D'après le cahier des charges ces tôles doivent être recuites par le fournisseur après cisaillage.

Pour prélever les éprouvettes, on enlève à la cisaille sur un des côtés de la tôle une partie de 100 millimètres qui sera la largeur des têtes ; le corps du barreau étant de 25 millimètres, on enlève à la machine-outil 37 mil., 5 de chaque côté de l'axe de la bande après avoir eu soin de redresser le métal à chaud comme l'indiquent les essais de M. Joëssel.

Dans ces conditions nous n'avons jamais trouvé d'anomalie dans les résultats dus au cisaillage des éprouvettes.

Influence de l'étirage à chaud au marteau ou au laminoir sur le métal

OPINION DU DR PERCY.— Le docteur Percy, dans son grand traité de métallurgie a étudié cette question importante; il prétend que la résistance des barres d'acier et de fer augmente jusqu'au quatrième et cinquième corroyage, pour diminuer ensuite jusqu'au dixième ou onzième.

EXPÉRIENCES DE M. CLAY.— M. Kirkaldy, dans son magnifique ouvrage sur les essais de résistance, donne les renseignements les plus intéressants sur des essais faits par M. Clay et par lui-même.

« On a pris du fer puddlé à nerfs de qualité ordinaire. On a choisi dans ce fer deux échantillons que l'on a mis de côté, en les marquant du n° 1, puis on a traité au marteau le massiot restant qui avait 5 pieds de haut: on l'a ensuite réchauffé et laminé en deux barres que l'on a désignées par le n° 2. Réservant de nouveau deux échantillons pris au milieu de ces barres, on a fait subir à ce qui restait les mêmes opérations, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on eut obtenu un fer travaillé douze fois. »

« Le tableau suivant donne la charge de rupture de chacun des échantillons de numéros différents. »

N° 1, fer puddlé naturel.	30 k. 8 par m/m^2 .
N° 2, 1 ^{er} corroyage.	37 k. —
N° 3, 2 ^e —	41 k. —
N° 4, 3 ^e —	41 k. —
N° 5, 4 ^e —	38 k. —
N° 6, 5 ^e —	43 k. —
N° 7, 6 ^e —	41 k. —
N° 8, 7 ^e —	38 k. —
N° 9, 8 ^e —	38 k. —
N° 10, 9 ^e —	37 k. —
N° 11, 10 ^e —	36 k. —
N° 12, 11 ^e —	30 k. —

« On voit que la qualité du fer a été en s'améliorant régulièrement jusqu'au n° 6, (la petite différence que nous donne le n° 5 pouvant probablement être attribuée à un défaut de l'échantillon), et que depuis le n° 6 nous redescendons par une progression inversement semblable. »

« M. Clay donne aussi les résultats de quelques essais faits sur des échantillons découpés dans le « Canon-monstre », dont les dimensions sont les suivantes: »

Longueur	15 pieds 10 pouces.
Diamètre à la base.	44 pouces.
— à la bouche	27 pouces.

« Les résultats ont été comparés avec ceux des essais faits sur le fer avec « lequel il avait été fabriqué. Voici les charges de rupture en kilogrammes par « millimètre carré : »

Fer primitif	moyenne	34 kilos.
Bouche du canon (sens du corroyage)	—	35 —
— (sens perpendiculaire au corroyage)	—	30 —
Alésures du canon travaillées à la houille.	—	43 —
— — au bois	—	53 —

« Comme M. Clay, dans les expériences sur les effets produits par les corroyages successifs donnés à une même barre, a trouvé que la résistance augmente jusqu'au cinquième corroyage et décroît ensuite, M. Kirkaldy regrette que l'on n'ait pas déterminé en même temps la striction, car la diminution de résistance pourrait tenir à ce que le fer est devenu plus doux pendant la suite des opérations. »

« M. Kirkaldy cite d'ailleurs l'expérience suivante qui lui est personnelle : »
 « Afin de déterminer à quel point un martelage additionnel améliorerait la qualité du fer, tel qu'il existait dans un arbre à manivelles, trois masses de 1 pouce 3/4 carré ont été forgées à 1 pouce 1/8 de diamètre, et amenées à 1 pouce sur le tour ; on a obtenu les résultats suivants : 26,508 kilogrammes, 23,060 kilogrammes, 22,608 kilogrammes avec des strictions respectives de 17,2 ; 7,9 ; 9,8 %. Une éprouvette simplement tournée a donné 20,193 kilogrammes et 12,5 % de striction. »

« M. Clay a fait des expériences du même genre sur l'acier puddlé, et il a obtenu les résultats suivants : »

N° 1 acier puddlé en barres	kilos.
N° 2 le même acier travaillé.	85 —
N° 3 —	78 —
N° 4 —	85 —
N° 5 —	78 —
N° 6 —	78 —
N° 7 —	64 —
N° 8 —	64 —
N° 9 —	64 —
N° 10 —	64 —

« On voit que dans ce cas la résistance à la rupture a augmenté tout d'un coup. Nous avons exprimé le regret que l'on n'ait pas mesuré en même temps la striction, attendu que la diminution de résistance tient peut être à ce que le métal devient plus doux. »

« Cette supposition paraît confirmée par les remarques de M. Clay au sujet

« des expériences précédentes : « La cassure dans les échantillons, dit-il, quand elle est produite par le marteau de la manière usuelle, présente à l'œil une très légère différence. La couleur et la grosseur des cristaux sont les mêmes, à peu de chose près, dans les numéros 2 et 10, mais si la rupture est due à la traction, alors apparaît une différence des plus marquées : les numéros supérieurs présentent dans leur cassure une fibre soyeuse, sans que les caractères de l'acier soient altérés, car le n° 10 durcit, passe par les différentes teintes, enfin possède toutes les propriétés distinctives de l'acier. »

EXPÉRIENCES DE M. LE BASTEUR. — Pour étudier les modifications que le forgeage peut amener dans les propriétés physiques de l'acier, cet ingénieur partagea en deux un lingot d'acier Siemens-Martin et en forma des barres carrées de 36 millimètres de côté, au marteau pilon pour l'un des morceaux, et au laminoir pour le second ; puis on découpa à la machine-outil des éprouvettes de 14 millimètres de diamètre.

A la traction on obtint les résultats suivants :

Lingot étiré au laminoir	{ Résistance par millim. carré.	40 k.
Moyenne de 5 épreuves.	Allongements	13.5%
Lingot étiré au marteau-pilon.	{ Résistance par mill. carré	52 k.
Moyenne de 5 épreuves.	Allongement.	17 %

Dans la même coulée, on avait fait des lingots pour bandages. Dans un de ces bandages, on préleva des morceaux qui furent laminés en barres carrées, ayant pour côté 35, 45 et 60 millimètres ; comme tout à l'heure, on tourna dans ces barres des éprouvettes cylindriques de 14 millimètres de diamètre, qui furent soumises à des essais de traction.

ÉPROUVEUSES CYLINDRIQUES de 14 m/m de diamètre, provenant de :	RÉSISTANCE par m/m ² .	ALLONGEM. %.
	kil.	
1 ^o Barre laminée ayant une section carrée de 60 m/m de côté. — Moyenne de 5 essais	55.0	18.6 %
2 ^o Barre laminée ayant une section carrée de 45 m/m de côté. — Moyenne de 5 essais.	56.0	20.8
3 ^o Barre laminée ayant une section carrée de 35 m/m de côté. — Moyenne de 5 essais.	54.6	23.1

Les éprouvettes provenant du bandage avaient subi un forgeage bien plus considérable que celles provenant du lingot, et, comme elles ont une résistance

et un allongement beaucoup plus considérables que les premières, il faut bien admettre que le forgeage ou le laminage augmente très sensiblement les propriétés de ténacité et d'allongement de l'acier.

Influence du laminage et du martelage à froid

EXPÉRIENCES DE FAIRBAIRN. — Cet éminent ingénieur a opéré l'essai suivant sur du fer :

	RÉSISTANCE à la rupture par m/m ² .	ALLONGEM. total sur 254 m/m.	ALLONGEM. %
	kil.	m/m	
Barre à sa sortie du laminoir	41	50,8	20,0
Même barre tournée à un pouce anglais de diamètre	42	55,8	21,0
Même barre laminée à froid et tournée à un pouce anglais de diamètre	62	20,06	7,8

Le laminage à froid augmente donc pour le fer la charge de rupture, et diminue considérablement l'allongement.

EXPÉRIENCES DE M. BARBA. — M. Barba a étudié cette question pour l'acier, sur des cornières du Creusot et des tôles B₁₀ et C₁₁ de la même usine.

La résistance moyenne des cornières du Creusot est, à l'état naturel, de 45 kilog. 7 par millimètre carré avec un allongement de 24,5 %.

On tailla dans des cornières des éprouvettes qui furent martelées énergiquement sur toute leur surface, puis amenées à une section uniforme et cassées à la machine.

La moyenne de 6 barettes de 60 millimètres de large donna :

Résistance à la rupture	53 k. 8 par millimètre carré.
Allongement % à la rupture	17 2 —

Le martelage avait donc augmenté la résistance de près de 20 %, et diminué l'allongement d'une façon très sensible, caractères de la trempe ; cette opération produit donc des effets de même nature que le cisaillage et le poinçonnage.

Pour les tôles, les résultats furent tout aussi significatifs.

	RÉSISTANCE à la rupture.	ALLONGEM. %
	kil.	
Tôle d'acier B ₁₀ . { au naturel.	41,3	32
	50,0	6
Tôle d'acier C ₁₁ . { au naturel.	39,3	85
	45,6	10

Les pertes des allongements seraient donc beaucoup plus considérables dans cette série d'expériences, mais on n'a pu faire qu'un essai pour chaque tôle et, de plus, le martelage fut plus énergique.

M. Barba, pour démontrer l'exactitude de ses idées, fait la remarque que, s'il est vrai qu'une barrette martelée subit une action analogue à la trempe, il suffirait de faire recuire une barrette après le martelage pour qu'elle reprenne ses qualités primitives de résistance et d'allongement.

Il prit un certain nombre de barreaux d'épreuves des cornières du Creusot, et les martela sur toute leur surface; puis, après les avoir chauffés au rouge cerise, on les laissa se refroidir lentement; on obtint alors à la traction, comme moyenne des essais :

Résistance à la rupture	47 k. 2
Allongement % à la rupture	23 %

Le métal avait donc repris ses qualités premières de ténacité et d'élasticité.

Influence de la chaleur

On sait par la pratique que la chaleur a une influence considérable sur la résistance des fers; il y a donc intérêt à rechercher dans quelle limite la résistance et l'élasticité des métaux varie avec la température du milieu ambiant.

Cette question a été l'objet d'un très grand nombre de travaux de Thürston, l'Institut Franklin, Fairbairn, Kirkaldy, le docteur Jenle, Peter Spence, Kollmann, Le Chatelier. M. Thürston a examiné les principaux travaux dans une note qu'il a publiée en 1873; il a admis les deux conséquences principales :

1° La résistance à la rupture par millimètre carré de section pour le fer, et le cuivre, varie, en général, en sens inverse de la température;

2° La résistance vive de rupture du fer et du cuivre varie dans le même sens que la température.

ESSAIS DE M. KOLLMANN. — M. Forquenot, membre de la Commission centrale des machines à vapeur, a traduit de l'*« Engineering »* un extrait des recherches de M. Kollmann, sur la résistance du fer et de l'acier à des températures élevées.

Le fer fibreux, le fer à grain fin et l'acier Bessemer ont été soumis à des essais de traction à des températures progressives de 0 à 1 000 degrés.

Les trois métaux ont une allure à peu près semblable ; on ne discutera pas leurs différences, désirant seulement faire ressortir les grandes variations.

Jusqu'à 100 degrés, la résistance à la rupture des trois métaux ne diminue pas, et même jusqu'à 200 degrés pour le fer à grain et l'acier, celle du fer fibreux décroissant alors de 5 % à cette température.

Mais, à 300 degrés, les résistances à la rupture ne sont plus que de 90 % ; à 500 degrés, 40 % ; à 700 degrés, 20 % de la résistance du métal à la température ordinaire.

On avait depuis longtemps la notion de cette diminution de résistance, mais elle n'était pas exactement mesurée ; ces nombres font voir avec quelle facilité les fers surchauffés peuvent céder à la pression ordinaire de marche des générateurs.

La note ci-dessous est la reproduction de l'article de l'*Engineering* :

« En 1877-1878, M. Kollmann a fait, aux usines d'Oberhausen, une série d'expériences sur la résistance à la traction du fer et de l'acier à différentes températures et sur leur résistance à la compression. Les résultats de ces expériences ont été publiés dans les « *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerhfleisses*. »

» L'*Engineering* espère qu'à la prochaine occasion il pourra donner à ses lecteurs des détails complets sur ces expériences, et la manière dont elles ont été conduites ; quant à présent, il ne mentionne que quelques détails saillants.

» Les essais ont été faits sur du fer fibreux, sur du fer présentant une cassure à grain fin et sur l'acier Bessemer. Chacun de ces métaux a été essayé à des températures variant de 20 à 1 080 degrés centigrades, et, pour rendre possibles les comparaisons, les résultats des essais ont été réduits au tant pour 100 de la force de chaque métal à la température de congélation de l'eau ; la résistance à cette température était représentée par 100.

» Le tableau suivant donne un sommaire de ces résultats.

TEMPÉRATURE		FER fibreux.	FER à grain fin.	ACIER Bessemer.
Centigrades.	Fahrenheit.			
Degrés.	Degrés.			
0	32	100	100	100
100	212	100	100	100
200	392	95	100	100
300	572	90	97	94
500	932	38	44	34
700	1 292	16	23	18
900	1 652	6	12	9
1 000	1 832	4	7	7

« On verra d'après ces résultats, qu'en général, aux températures correspondant aux pressions de vapeur les plus élevées, la résistance de l'acier Bessemer, du fer à grain fin, n'est pas altérée, tandis que celle du fer fibreux souffre, mais très faiblement. Au-dessus de 205 degrés centigrades (400 degrés Farh. environ), l'acier Bessemer paraît perdre de la résistance moins rapidement que le fer fibreux, et le fer à grain fin moins que l'acier, bien qu'à la température de 500 degrés centigrades la perte de résistance soit plus grande pour le Bessemer que pour les deux autres métaux. Cependant, ce résultat exceptionnel paraît provenir d'une erreur expérimentale. Une remarque plus importante, résultant de ces expériences, est, qu'entre 315 et 538 degrés centigrades (600 et 1 000 degrés Fahr.), une perte de force plus rapide et plus considérable se produit dans tous les métaux essayés, fait qui indique fortement le danger de surchauffer les tôles des chaudières. »

ESSAIS DE M. ADAMSON. — Aux séances de l'Institut du fer et de l'acier, tenues à Paris en 1878, M. Adamson a rendu compte d'essais qu'il avait entrepris pour étudier l'influence de la température sur les qualités de résistance et la malléabilité du fer et de l'acier.

M. Adamson a remarqué que les très bons fers et les aciers doux se travaillent facilement et résistent très bien au choc, jusqu'à une température de 220°, mais qu'à partir de 220 jusqu'à 375°, ils deviennent facilement aigres, et se brescent sous l'influence de chocs peu importants. Les métaux inférieurs sont absolument sans consistance à cette température.

Voici des essais à la traction :

	CHARGE de tension maxima. kil.	CHARGE au moment de la rupture. kil.	ALLONGEM. à la rupture sur 127 m/m.
Fer en barre extra.	39.2	36.1	27
Fer en barre extra.	30.4	19.9	34
			ALLONGEM. à la rupture sur 254 m/m.
Acier doux.	43.3	36.7	30
Acier doux Siemens-Martin.	41.6	35.3	27

Ces métaux de qualité supérieure présentaient donc à la température ordinaire des qualités de malléabilité très remarquables; ils avaient aussi très bien supporté les épreuves de pliage à froid et à la chaleur rouge.

M. Adamson fit chauffer ces éprouvettes dans un bain de suif bouillant à 320°; elles se rompaient au pliage et se brisaient net sous un coup de marteau.

Cette température spéciale, où les métaux deviennent *rouverains*, M. Adamson lui a donné le nom de « *colour heat* » ou « chaleur de couleur. »

Des observations, faites pendant plusieurs années, ont démontré à cet habile ingénieur que le fer très doux et très pur de la seconde expérience est le seul qui ne subisse pas l'influence de cette température, mais on voit que cette qualité est achetée au détriment de la résistance à la traction, puisque la charge de rupture est de 40 % plus faible que celle du premier échantillon du fer extra.

EXPÉRIENCES DE M. JOËSSEL. — M. Joëssel entreprit une série de plus de trois cents essais à la traction, sur du fer moyen supérieur très homogène, et porté à une température variant de 0 à 400°; on a pris toutes les précautions pour que les essais se fassent aussitôt que les éprouvettes sortaient du bain d'huile ou de plomb fondu, qui était destiné à les porter à la température désirée; de plus, on a tenu compte, autant que possible, de la perte de chaleur que le métal subissait pendant la durée de l'essai.

M. Joëssel a conclu de ses expériences :

1° Les résistances à la rupture du fer diminuent à partir de 0 jusqu'à 70°, où elles passent par un minimum, puis elles augmentent jusqu'à 180°, qui est un maximum, pour décroître ensuite régulièrement, au fur et à mesure que la température augmente.

2° Les allongements augmentent d'abord avec les températures, pour atteindre un maximum vers 20°, puis diminuent jusqu'à un minimum qui a lieu vers 100 à 110°, et augmentent ensuite sans cesse avec la température.

3° Les résistances vives de rupture présentent des variations sensiblement analogues à celles des allongements; toutefois, d'après la forme même de la courbe tracée par M. Joëssel, avec les résultats des essais, il y a lieu de se demander si, au-delà de 400°, la résistance vive ne diminuerait pas ou bien ne serait pas constante.

M. Joëssel fait remarquer que, d'après différentes expériences, auxquelles il a procédé, il lui semble « que les métaux forgés sont plus affectés par les variations de température que les métaux fondus. Mais ce n'est là encore qu'un aperçu qui mérite de nouvelles recherches. »

EXPÉRIENCES DE M. ANDRÉ LE CHATELIER. — M. Le Chatelier a étudié les propriétés mécaniques des métaux et spécialement du fer, de l'acier et quelques alliages sur des fils recuits de 0^{mm},6 de diamètre; nous ne nous occuperons ici que du fer et de l'acier.

Il avait disposé ses expériences pour chercher à remplir les conditions suivantes :

« 1° Emploi d'échantillons identiques comme calibrage et composition chimique; un fil de 0^{mm},6 peut en effet être considéré comme ayant une composition constante sur une grande longueur.

« 2° Chauffage suffisamment uniforme.

« 3° Mise en charge continue, sans chocs et avec une vitesse constante que l'on peut régler à volonté. »

Un des points les plus intéressants des expériences de M. Le Chatelier serait la découverte d'un allongement spécial, dans les essais à la traction opérés à chaud.

« Il existerait également, dit M. Le Chatelier, d'après mes expériences (en dehors des deux modes d'allongement connus, *l'allongement proportionnel* et *l'allongement par striction*), un troisième mode d'allongement que je déignerai sous le nom *d'allongement proportionnel par recuit*; cet allongement est proportionnel en ce sens qu'il se produit sur toute la longueur du métal en essai, au lieu de se localiser sur une faible longueur comme la striction; mais il n'y a plus aucune relation entre l'allongement et l'effort qui le produit: c'est-à-dire que, sous un effort constant, le métal s'allonge jusqu'à rupture avec une vitesse sensiblement constante, vitesse qui peut être très faible. »

« Cet effet est dû à un recuit, qui détruit l'écrouissage au fur et à mesure de sa production, avec une vitesse d'autant plus grande que la température est plus élevée. Il en résulte que, pour une même charge, la vitesse d'allongement

« par recuit croît avec la température. A une même température, la rupture peut être produite par des charges variables, et la vitesse d'allongement croît alors avec la charge.

« L'allongement par recuit se produit dans tous les métaux à partir d'une température convenable : dès la température de 15° pour le cuivre et l'argent; au-dessous de 70° pour le zinc ; à partir de 280° pour l'aluminium, et de 350° pour le bronze d'aluminium, le nickel et ses alliages.

« La charge minima nécessaire pour produire l'allongement par recuit, avec une vitesse sensible (rupture en 30'), est assez forte à ces températures limites; cette charge minima décroît rapidement avec l'élévation de la température jusqu'à prendre une valeur très faible. On atteint alors la température de recuit complet du métal, qui est de 150° pour le zinc, voisine de 500° pour l'aluminium, supérieure à 500° pour les autres métaux étudiés.

« Les allongements à la rupture, suivant les métaux et les températures, sont composés d'un seul ou de plusieurs des trois modes d'allongement : proportionnel, par recuit et par striction. Ainsi le nickel et le bronze d'aluminium présentent, jusqu'à 350°, l'allongement proportionnel, et, au-dessus de 350°, l'allongement proportionnel et par recuit ; le cuivre possède les trois modes d'allongement à toutes les températures ; le zinc s'allonge à 150° par recuit et par striction, et à 200° il ne s'allonge plus que par striction. Aussi les allongements de rupture ne suivent-ils aucune règle précise. »

Le fer puddlé, essayé en fils fins, n'a donné que des résultats très irréguliers par suite de l'impureté du métal. Cet expérimentateur n'a donc pu agir que sur des fers ou aciers fondus très purs, contenant 0,35 à 0,40 de manganèse et de 0,05 (fer fondu) à 0,80 (acier mi-dur) de carbone.

La vitesse uniforme des essais a été de 1^k,500 par millimètre carré de section et par minute.

La longueur utile de l'éprouvette a été de 0^m,150.

Les expériences ont montré que le fer et l'acier se comportent d'une manière toute différente des autres métaux ou alliages, pour lesquels la charge de rupture diminue au fur et à mesure que la température augmente, tandis que les allongements produits par une même charge augmentent avec la température.

La vitesse de mise en charge sur les allongements est peu sensible.

Le tableau ci-contre résume les observations de M. Le Chatelier, sur le fer et l'acier.

« En résumé, dit M. Le Chatelier, il se produit, dans les propriétés mécaniques du fer et de l'acier fondus, deux modifications ; l'une se fait sentir à partir de 80°, la seconde à partir de 240° environ ; ces modifications dépendent à la fois de la température et de la vitesse de mise en charge, c'est-à-dire du temps et des efforts auxquels le métal est soumis. Elles ne peuvent avoir pour cause que des transformations se produisant sous l'influence simul-

		CHARGE DE RUPTURE va en décroissant de	ALLONGEMENT %.	OBSERVATIONS.
Première phase de 15° à 18°	Fer fondu.	36 k7 à 33 k3	30 %	
	Acier fondu.	68.7 à 64.6	20 %	
Deuxième phase de 100° à 240°	Fer fondu.	reste sensiblement constante environ 35 k	7 à 9 % varie entre	L'allongement n'est pas continu, il se fait par saccades, accompagnées de craquements.
	Acier fondu.	65	3 à 7	
Troisième phase au-dessus de 240°	Fer fondu.	44 k2 de 250° à 300° puis diminue avec la température de 72 k8 à 250° à 75 k9 à 300° puis diminue avec la température	Va en augmentant de 200° à 300°	L'allongement par recuit commence à se produire vers 350°
	Acier fondu.			

« tanée de ces efforts et de la température, transformations qui sont d'autant plus complètes que la température est plus élevée, et que le métal reste plus longtemps soumis à l'action de ces efforts.

« Ces transformations sont permanentes et se traduisent, après refroidissement, par une élévation considérable de la limite élastique, de la charge de rupture, et par une réduction notable de l'allongement.

« Parmi les nombreuses expériences que j'ai faites à ce sujet, je citerai la suivante : 3 fils de fer fondu, d'une longueur de 0^m,20, ont été chargés à 15° à raison de 30 kilogrammes par millimètre carré, charge qui leur a donné un allongement de 9 %. En cet état, ils ont été chauffés : le n° 1, à 74° ; le n° 2, à 92° ; le n° 3, à 190°, chacun pendant 10 minutes. Après refroidissement, ils ont donné les résultats suivants :

	LIMITE ÉLASTIQUE	CHARGE DE RUPTURE	ALLONGEMENT
N° 1 (74°)	33 kg. 500	38 kg. 200	21 %
2 (92°)	36 » 600	37 » 400	2
3 (190°)	40 »	41 » 600	4

Essais de M. Reinau. — M. Reinau a opéré, non plus sur des fils, mais sur des fers en barre. Cet expérimentateur a fait varier les températures de — 25° à + 430° et il a trouvé, comme l'indiquent les chiffres ci-dessous, que le fer présentait un maximum de résistance à la rupture à 228°, et que pour des températures inférieures ou supérieures, les résistances diminuaient.

Températures.	Charges maxima de résistance Nombre proportionnel.
— 25°	69
+ 20°	77
+ 100°	80
+ 187°	96
+ 228°	100
+ 230°	89
+ 430°	24

Essais de M. Bauschinger. — M. Bauschinger a essayé les tôles de fer laminées à la couleur rouge sombre, et il a trouvé pour les charges de résistances maxima à la rupture :

1^o Tôles puddlées. — Sens perpendiculaire au laminage.

Charge maxima à la rupture	Nombre proportionnel
A la température ordinaire	100
Au rouge sombre.	28,8

La tôle a donc perdu 71 % de sa résistance.

2° Tôle puddlée. — Sens du laminage ;

Charge maxima à la rupture	Nombre proportionnel
A la température ordinaire	100
Au rouge sombre	16,9

La tôle a donc perdu 83 % de sa résistance.

En résumé on voit combien les différentes questions que soulèvent l'influence de la température sur la résistance du fer de l'acier présentent encore de lacunes, d'obscurité et même de contradictions.

Au point de vue pratique il semble pourtant se dégager de ces diverses expériences, que les métaux ne sont jamais portés à une température amenant un affaiblissement de résistance, sauf les cas où par manque de graissage, ou par suite d'accidents absolument anormaux, ils arrivent à s'échauffer jusqu'au rouge sombre.

En ce qui concerne les générateurs à vapeur, aux pressions de marche comprises entre 5 kilogrammes et 15 kilogrammes, correspondant à une température de 150° à 200°, il ne peut y avoir de diminution sensible de la résistance des tôles, sauf dans le cas où par manque d'eau, dépôts d'incrustation, ou de corps étrangers sur les tôles, des surfaces plus ou moins grandes des tôles peuvent être portées au rouge par suite de l'intensité du feu.

Un nombre notable d'accidents de chaudières n'a pas d'autres causes.

Influence des tractions réitérées.

EXPÉRIENCES DE HENRI TRESCA. — L'éminent sous-directeur du Conservatoire des Arts et Métiers a fait des expériences les plus intéressantes sur cette importante question.

Il a soumis à la flexion des rails de fer et d'acier ; pendant toute la période d'élasticité il a trouvé que les allongements croissaient proportionnellement aux charges, une fois la limite d'élasticité atteinte et dépassée notablement, les allongements croissaient plus rapidement que les charges.

M. Tresca obtenait ainsi des rails déformés d'une manière permanente ; il opérait sur cette nouvelle pièce comme sur les premières, chargeant légèrement pour rechercher la limite d'élasticité et, dans toutes ces expériences, la charge limite d'élasticité était supérieure à la précédente.

La limite d'élasticité reculait donc au fur et à mesure que la pièce était plus déformée par des charges croissantes antérieures.

M. Tresca conclut :

« Mais ce qui distingue surtout les expériences actuelles, c'est qu'elles démontrent que la limite d'élasticité s'éloigne pour une même barre, à mesure qu'elle a été préalablement soumise à des actions plus énergiques, se traduisant par des flèches permanentes de plus en plus grandes, et que, par la mise en fonction plusieurs fois répétée des ressorts moléculaires, cette limite d'élasticité peut être reculée jusque dans le voisinage de la rupture, sans que pour cela le coefficient d'élasticité ait varié d'une manière notable.

« On observe toutefois un amoindrissement du coefficient primitif qui peut aller jusqu'au dixième de la première valeur.

« Le fer et l'acier de ces rails, dans leur état industriel, ont à peu près le même coefficient d'élasticité mesuré par $E = 21 \times 10^9$. »

On voit donc combien il sera nécessaire, dans les essais des matériaux, de laisser les métaux toujours sous l'influence des charges croissantes, et d'abandonner l'ancienne pratique, qui consiste à augmenter la charge par degrés en la supprimant à chaque observation d'allongement, pour s'assurer que le métal revient bien à sa position première. Ce procédé est donc absolument faux ; il est bien préférable d'opérer la traction progressivement et sans déchargement, et de déterminer la limite d'élasticité, lorsqu'on n'agit pas avec les machines d'essai du colonel Maillart ou de Thomasset, par les courbes de résistance dont nous parlerons ultérieurement.

BUT DES ESSAIS A LA TRACTION

On opère les essais à la traction pour étudier.

1^o La résistance plus ou moins grande du métal aux efforts qui tendent à le rompre après déformation. On mesure cette ténacité du métal en recherchant les charges maxima qu'il peut supporter jusqu'à la rupture ;

2^o La ductilité du métal, ou sa plus ou moins grande facilité à se déformer sous une charge donnée, se mesure en pratique :

A. — Par l'allongement total que prend sous la charge maxima une longueur fixe tracée sur l'éprouvette d'essai.

B. — Par la mesure de la striction, c'est-à-dire par la diminution de section qui se produit, en général, en un point spécial de l'éprouvette nommé section de rupture.

Lorsque l'on soumet une éprouvette d'un métal quelconque aux efforts de traction, on observe, dans les phénomènes qui précèdent la rupture, trois périodes parfaitement distinctes :

1^o *Période élastique.* — On a admis pendant bien longtemps que durant cette période, le métal prenait des allongements proportionnels à la charge qu'il supportait et que, de plus, ces allongements disparaissaient lorsque la charge était enlevée, c'est-à-dire que la barre ne subissait, dans ce cas, aucun allongement permanent.

Cette définition ancienne de l'élasticité n'est pas exacte, car, au fur et à mesure que les moyens d'observations se sont perfectionnés, on a pu observer que, même des charges très inférieures à celle de la limite d'élasticité, donnaient lieu à des allongements permanents.

Cette question est si importante que je la traiterai d'une façon spéciale.

Il existe, en effet, bien des applications en mécanique où la connaissance des caractéristiques de l'élasticité du métal est aussi importante que celle de la période de rupture.

On appelle *charge à la limite d'élasticité*, la tension par millimètre carré de section qui produit, dans l'hypothèse que nous avons faite ci-dessus, le premier allongement permanent, et *allongement d'élasticité*, l'allongement total que le métal a pris sous cette charge.

2^o *Période de déformation*, qui va de la limite d'élasticité pour aboutir au maximum de résistance.

Pendant cette période, l'éprouvette s'allonge régulièrement, diminuant de section uniformément, puis, à un certain moment, en général, en un point de l'éprouvette, se produira une déformation importante de la section, appelée *striction* ; la charge observée, au moment où commence la striction, est appelée *charge du maximum de résistance*.

3^o *Période de rupture*, qui s'étend depuis le moment du maximum de résistance jusqu'à l'instant de la rupture de l'éprouvette.

Pendant toute cette période, la charge décroîtra.

Pour se rendre compte de tous ces phénomènes, il ne faut pas, bien entendu, que l'expérience soit faite sur une simple machine à levier. Il est nécessaire, que, si sur une des extrémités de l'éprouvette on produit la puissance, l'autre extrémité permette, par un manomètre, ou autre appareil, de se rendre compte à chaque instant de la résistance propre de l'éprouvette, résistance qui fait équilibre à la puissance ; les machines à essayer les métaux de M. Thomasset et du colonel Maillard sont construites d'après ces principes.

Si donc nous récapitulons les résultats d'un essai ainsi régulièrement conduit, nous voyons que nous obtiendrons les renseignements, sur :

1^o Charge à la limite d'élasticité et allongement correspondant ;

- 2° Charge du maximum de résistance. Allongement correspondant ;
- 3° Charge minima à la rupture. Allongement correspondant ;
- 4° Allongement total après rupture :
- 5° Mesure de la striction, par la mesure de la section de l'éprouvette à la partie rompue.

Dans la pratique, pour caractériser le métal, on se sert en général de ces renseignements de la façon suivante :

La ténacité du métal est mesurée d'après la charge au maximum de résistance, en l'exprimant en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive de l'éprouvette, et aussi de la section de l'éprouvette après rupture ; on dit que l'on a la charge de rupture par millimètre carré de section primitive ou de section de rupture.

Ces renseignements, d'un usage si courant, sont absolument sans valeur précise, car il n'est pas vrai, comme nous le verrons, que les charges de maximum de résistance et de rupture soient égales, la seconde étant, dans bien des cas, de beaucoup inférieure à la première, et de plus, dans les métaux très ductiles la section des barres d'essai sous la charge du maximum de résistance est bien moindre que la section primitive.

Pour la ductilité, on mesure l'allongement total après rupture et on l'exprime en pour cent de la longueur primitive entre les repères tracés sur l'éprouvette.

Pour la striction, certains ingénieurs la mesurent en prenant le rapport $\frac{S'}{S}$ (1), S étant la section primitive de l'éprouvette, S' la section de l'éprouvette après rupture ; d'autres personnes, au contraire, appellent la striction, *contraction*, et la mesurent par la formule $\frac{S - S'}{S}$ (2).

L'anomalie dans ces deux manières d'opérer est visible, puisque plus la striction sera faible, plus le rapport $\frac{S'}{S}$ sera grand et $\frac{S - S'}{S}$ petit.

Il est vrai que l'on peut facilement passer d'une formule à l'autre, puisque $\frac{S - S'}{S}$ n'est autre que le complément de $\frac{S'}{S}$ par rapport à 1, mais il serait encore plus simple de s'entendre et de choisir une manière unique d'exprimer un même phénomène.

RÉSISTANCE DES MÉTAUX

Nous allons examiner certains points intéressants concernant les essais des métaux, pour mesurer leur ténacité ou leur résistance, et que nous venons d'indiquer d'une façon générale.

Différence entre la charge maxima de résistance et la charge de rupture.

EXPÉRIENCES DE M. ADAMSON. — Au Congrès tenu à Paris en 1878, par l'Institut du Fer et de l'Acier, M. Adamson a rendu compte de nombreux essais à la traction.

Il fait remarquer d'abord qu'il faut distinguer entre la *charge de tension maxima* et la *charge de rupture*.

Pour les métaux doux et ductiles, la charge de rupture n'est souvent que les $\frac{3}{4}$ de la charge de tension maxima, tandis que l'allongement sous la charge de tension maxima n'est que les $\frac{5}{8}$ de l'allongement final de rupture.

Pour les aciers durs et les tôles de fer ordinaire, au contraire, la différence entre les deux charges est peu importante, ces métaux cassent sous la charge de tension maxima avec très peu de réduction dans la section.

Voici un exemple cité par M. Adamson :

Numéros des essais.	Longueur de l'éprouvette.	Section.	Tension maxima.	Allongement correspondant.	Charge amenant la rupture.	Allongement à la rupture.	
	m/m	m/m ²	k		k		
23	254	645	46.9	15.0	40.6	26.0	Acier doux Bessemer
24	254	612	43.5	19.0	36.4	24.0	"
25	254	592	43.5	16.0	38.9	21.0	"
26	254	600	43.6	17.5	38.7	24.0	"
28	254	645	43.0	18.5	39.8	25.0	"
Moyennes.		. . .	44.1	17.2	38.8	24.0	
41	127	240	53.7	28.5	42.4	34.0	Acier doux pour rivets
42	127	240	54.9	28.5	37.7	33.5	"
48	254	645	43.3	19.0	36.7	30.0	Acier doux.
49	254	645	41.6	16.5	35.3	27.0	"

Si nous examinons les moyennes de la 1^{re} série d'essais faits avec le même métal, on voit que :

La charge de rupture est 12 % plus faible que la charge de tension maximum.

L'allongement à la rupture est 29 % plus grand que l'allongement sous la charge de tension maxima.

M. Adamson a essayé, à ce point de vue, différents métaux.

Avec de l'acier dur, rompant sous une charge de 84^k,1 par millimètre carré de section primitive, la charge de tension maxima et la charge de rupture sont égales ainsi que les allongements correspondants ; les mêmes observations ont lieu pour les fers ordinaires. Mais les fers en barres extra doux de Suède et les fers pour rivets se comportent sensiblement comme les aciers doux, c'est-à-dire que la charge de rupture est inférieure à la charge de tension maxima, et l'allongement à la rupture est bien supérieur à l'allongement sous la tension maxima :

Numéros des essais.	Longueur.	Section.	Tension maxima.	Allongement correspondant.	Charge amenant la rupture.	Allongement à la rupture.	
43	127	388	38.4	16.5	35.4	28.5	Fer spécial à rivets.
44	127	388	39.5	18.5	34.8	33.0	
Moyennes.. . . .			38.9	17.5	35.1	30.7	

Dans cet essai, la charge de rupture est inférieure de 10 % à la charge de tension maxima, et l'allongement correspondant à la rupture est, au contraire, supérieur de 75 % à celui correspondant à la tension maxima.

ESSAIS DE M. DE MONTGOLFIER. — M. Considère, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, dans son magnifique travail sur l'emploi du fer et de l'acier, cite deux expériences dues à M. de Montgolfier, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées :

	Charge du maximum de résistance.	Charge à la rupture.	Δ 0/0.
Essai d'un barreau en fer fin très doux..	6 100 k	5 300 k	13.11
Essai d'un barreau en acier très doux..	8 100	6 200	23.45

Dans cette expérience, la charge à la rupture est inférieure de 23 % à la charge du maximum de résistance,

ESSAIS DU GÉNIE MARITIME. — Le Génie maritime a reconnu l'erreur que l'on commet, quand on confond la charge maxima de résistance et la charge de rupture, et M. l'Ingénieur Gallon, dans son rapport de mission de 1887, demande que dans les essais faits dans les ports, on enregistre non pas la charge au moment de la rupture, mais bien la charge maxima atteinte par la colonne manométrique de la machine d'essai.

« A dater de cette charge maxima, dit cet ingénieur, il se fait un très grand allongement dans la barrette, la striction se prononce, et la pression accusée par la colonne manométrique, va toujours en baissant, pour être assez faible au moment précis de la rupture et tomber à zéro à l'instant qui suit. »

Erreur commise en rapportant la charge maxima de résistance en kilogrammes carrés par millimètre carré de la section primitive.

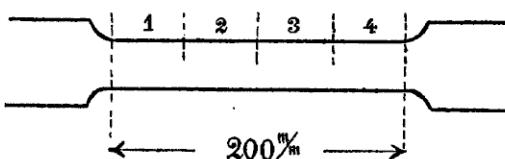
Pendant la première période élastique, et la deuxième période jusqu'au moment où la charge atteint le maximum de résistance, l'éprouvette s'allonge sur toute sa longueur. D'après les expériences de M. Barba, Ingénieur en chef du Creusot, le volume de l'éprouvette peut pratiquement être considéré comme constant; il faut que la section diminue proportionnellement à l'allongement, de telle façon qu'on ait toujours, en appelant :

- S la section primitive du barreau ;
- l la longueur entre repères ;
- S' la section nouvelle considérée ;
- l' la longueur entre repères correspondante ;

$$S l = S' l'$$

Examinons si l'expérience vient confirmer ce raisonnement.

EXPÉRIENCES DE M. E. CORNUT. — Les éprouvettes d'acier doux avaient 200 millimètres de longueur utile entre les repères, et on a divisé cette longueur en 4 parties égales de 50 millimètres chacune.



L'éprouvette cassait, ou dans les parties voisines des têtes 1 et 4, ou dans les parties médianes 2 et 3; dans le premier cas, nous avons pris pour calculer les

sections au maximum de résistance, les parties 3 ou 2, et dans le second cas, les parties médianes non cassées, 3 ou 2. De manière que la section considérée soit le moins possible influencée par la rupture ou par les têtes.

D'après ce que nous avons appelé plus haut, en lisant sur l'éprouvette la longueur l' après la rupture, nous déterminions la nouvelle section de l'éprouvette par la formule.

$$S' = \frac{Sl}{l'}$$

Nous avons calculé alors les différences % entre S et S' $\frac{S - S'}{S}$

Métal recuit dans le sens du laminage.

Moyenne de cinq essais.
Cassure dans (1 ou 4) 13,6 %

Métal recuit. — En travers du sens du laminage.

Moyenne de cinq essais.
Cassures dans (1 ou 4) 12,2 %

Moyenne de deux essais.
Cassures dans (2 ou 3) 16,0 %

La différence des sections avant et après la traction sera très variable, suivant la nature du métal ; en effet, pour les métaux durs et secs, acier ou fer dans lesquels les allongements avant rupture sont très peu importants, la différence entre la section primitive et la section sous la charge du maximum de résistance sera faible, et, par suite, l'erreur commise peu importante.

Pour les métaux très malléables, les fers de première qualité, les aciers soudables très doux, les allongements, avant que la striction ne se produise, sont très importants, et la différence de la section primitive et de la section sous la charge maxima est considérable, et l'erreur dans les résultats de même importance.

EXPÉRIENCE DE M. CONSIDÈRE. — Si nous reprenons les deux expériences déjà citées et que nous examinions les sections ;

	Section primitive.	Section avant le commencement de la striction.	$\Delta \%$.
	m/m	m/m	
Barreau en fer fin très doux.	201	176	12.43
Barreau en acier très doux.	201	180	10.44

La section, au moment de la striction, est donc de 12,43 % plus faible que la section primitive.

Conclusion. — De ces différents chiffres, il résulte donc que la manière ordinaire d'exprimer les résultats des essais de traction en kilogrammes par millimètres carrés de section primitive, fait commettre deux erreurs en sens contraire.

En prenant la charge maxima de résistance pour la charge de rupture, l'erreur est en trop de 13 % et 23 % et peut-être plus. En rapportant cette charge à la section primitive, on commet une erreur en moins qui peut varier de 10 % à 16 %, et plus.

L'incertitude même des variations, dont nous venons de parler, suivant la nature du métal et suivant son état, montre suffisamment que le renseignement que nous trouvons dans tous les tableaux d'essais « *Charge de rupture en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive* » n'a aucune valeur.

Le renseignement donné sous le titre « *Charge de rupture en kilogrammes, par millimètre carré de la section de rupture* » est tout aussi erroné, puisque ce n'est pas la charge de rupture dont on fait usage pour exprimer ce résultat, mais bien la *Charge de maximum de résistance* dont nous avons tout à l'heure indiqué les différences considérables.

M. Kirkaldy, en présence des erreurs que nous venons de signaler, a proposé d'évaluer la résistance des métaux en prenant le rapport de la charge de rupture à la section de rupture.

Voici ce qu'il dit à ce sujet :

« Un très bon fer de Suède, au bois, martelé, à cassure très douce, fine et unique forme, ne porte que 34 kilogrammes par millimètre carré de section primitive ; « un fer puddlé, laminé, à gros grains irréguliers, supporte 45 kilogrammes. Mais, « dans le premier cas, la section est réduite de 50,5 %, dans l'autre, de 28 % ; « de sorte qu'à la fin, le fer de Suède supportait 85 kilogrammes et le fer commun 62 kilogrammes. Donc, la charge absolue de rupture est insuffisante pour classer « les diverses qualités de fer. Une charge de rupture élevée peut provenir de ce « que le fer de qualité supérieure, dense, fin et d'une douceur convenable, comme « elle peut provenir de ce qu'il est très dur et cède très difficilement. Une résistance faible peut tenir à une texture lache, et aussi à une extrême douceur alliée souvent à une qualité très fine.

« La charge de rupture, rapportée à la section de rupture, serait le meilleur coefficient pour juger de la qualité des fers et des aciers. »

Il nous paraît bien difficile d'accepter, comme le propose M. Kirkaldy, de représenter les qualités d'un métal, ténacité et ductilité, par le seul coefficient qu'il indique.

Il faudrait aussi rechercher dans quelles limites la section de rupture est influencée par la valeur de la section primitive, autrement dit si le rapport de $\frac{S'}{S}$ est indépendant de la grandeur de S.

La striction, pour un même métal, doit aussi être assez fortement influencée

par le mode d'action de la machine à essayer. Dans les machines à action directe ou à levier, dans lesquelles on fait les opérations assez rapidement, la charge du maximum de résistance que l'on confond avec la charge de rupture, est supportée par la section la plus faible. Mais il ne peut en être de même, comme nous l'avons déjà expliqué, dans les machines Thomasset et Maillard, où la résistance du métal fait constamment équilibre à la charge.

Si donc, nous supposons des éprouvettes de même métal et de mêmes dimensions essayées sur ces différents types de machines, en admettant qu'elles supportent la même charge de maximum de résistance, à partir de cet instant, c'est-à-dire juste au moment où commencera et s'effectuera la striction, elles seront soumises à des charges inégales, et on comprend que la grandeur de la striction puisse en être singulièrement affectée.

En résumé, l'usage qui s'est établi de juger la ténacité des métaux, en prenant la charge de maximum de résistance pour la charge de rupture, et en l'exprimant en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive ou de la section de rupture, ne représente qu'un rapport de chiffres sans aucune valeur réelle.

Les seuls chiffres exacts que puissent donner des essais de traction, tels qu'ils sont fait ordinairement, seraient donc :

Charge maximum de résistance rapportée à la section de l'éprouvette sous cette même charge.

Charge de rupture rapportée à la section de rupture.

Il est toutefois tout naturel qu'on ait rapporté dans la pratique la charge maxima de résistance, c'est-à-dire l'effort maximum qu'une pièce peut supporter à la section primitive, puisque, lorsqu'on veut calculer une pièce, c'est seulement cette section primitive que l'on connaît et non pas la section sous la charge maxima, malheureusement les résultats, tels qu'ils sont donnés par les essais, ne peuvent qu'induire les ingénieurs en erreur.

DUCTILITÉ

Allongement total après rupture. — Si on examine les allongements que peut prendre une barrette d'épreuve soumise à la traction de charges croissantes, on remarquera que sous la charge faible, on voit le barreau s'allonger de quantités, qui disparaissent en partie lorsqu'on enlève la charge, c'est ce qu'on appelle les *allongements élastiques*, qui sont sensiblement proportionnels aux

charges, et que nous désignons sous la lettre A_e . On appelle *allongement permanent*, A_p , l'allongement qui persiste malgré l'enlèvement de la charge.

Ces allongements permanents sont très peu importants pour des faibles charges, mais ils vont bientôt en augmentant jusqu'au moment où l'éprouvette est soumise à la charge maxima de résistance.

Pendant toute cette période, nous avons vu que la section de l'éprouvette diminuait presque uniformément et proportionnellement à la charge.

A un certain moment on voit apparaître, en un point de l'éprouvette, une diminution brusque de section et un allongement très rapide se produire jusqu'au moment de la rupture, c'est ce qu'on appelle *l'allongement de striction* A_s .

Si donc après la rupture on mesure *l'allongement total* A_t , qu'a pris l'éprouvette entre les deux repères, on voit qu'il aura

$$A_t = A_e + A_p + A_s$$

Or, A_e et A_p , pour une même charge, sont proportionnels à la longueur utile de l'éprouvette, c'est-à-dire, à la distance des repères, tandis que A_s ne dépend que de la nature du métal. A_t est donc la somme d'éléments de nature absolument différente, ayant entre eux des rapports variables, et, par suite, ne peut donner qu'un résultat complexe sans spécification précise.

Dans la pratique on exprime cet allongement total en % de la longueur primitive de l'éprouvette.

Il est facile alors de comprendre que, dans ces conditions, la longueur de l'éprouvette jouera un rôle considérable, rôle que nous étudierons ultérieurement.

DE LA STRICTION

Nous avons déjà expliqué que lorsqu'on soumet une éprouvette à la traction et qu'on a atteint la charge de tension maxima, on voit se dessiner en général, en un point du barreau, un étranglement très accentué, et même en diminuant les charges, on voit un allongement très important se produire ; la section diminue considérablement et enfin le barreau se rompt en cet endroit. — Ce phénomène s'appelle *striction*.

Ce fait est connu depuis très longtemps, et M. Barbé, colonel d'artillerie, directeur des forges de la Marine, indiquait déjà en 1834, dans ses essais sur les

fers destinés à la fabrication des câbles de vaisseaux, la striction, ou rapport de la section de rupture à la section primitive, il notait même la chaleur développée au point de rupture.

Mais M. David Kirkaldy, qui a opéré de très nombreux essais à la traction, est le premier, je crois, qui ait proposé de mesurer la ductilité des métaux, non plus par l'allongement total après la rupture, mais par la striction.

Cause de la striction. — En général on admet que la striction se produit au moment où le métal est soumis à la charge de tension maxima, et que, par suite de la non homogénéité du métal, une des sections, se trouvant soumise à un effort plus grand que les voisines, tend à se briser ; c'est ce qui a lieu pour les métaux secs et durs sans ductilité ; pour les métaux présentant au contraire une grande malléabilité, la résistance des molécules à la séparation des unes avec les autres, permet à la matière de s'allonger plus ou moins avant la rupture, et, comme la densité de la matière ne change pas beaucoup avant ou après rupture, il faut bien que le diamètre diminue au fur et à mesure que l'allongement se produit.

La charge *allant en augmentant* et le diamètre en diminuant, il est bien évident que la tension dans la section va toujours en croissant, et que la rupture doit s'en suivre.

On doit toutefois faire une remarque importante ; on admet en général, avec Poncelet, que les molécules des corps sont soumises à une force attractive et répulsive dont les intensités sont des fonctions différentes de la distance des molécules.

Lorsque l'attraction l'emporte sur la répulsion, la distance des molécules diminue et inversement ; mais lorsque le corps devient liquide, la force attractive est nulle ; on comprend donc que cette force attractive, d'abord croissante, passera par un maximum puis décroîtra jusqu'à zéro.

Des circonstances analogues se présentent lorsqu'on rompt un barreau à la traction ; en effet, lorsqu'on est arrivé à soumettre le barreau à la charge de maximum de résistance, on est aussi au maximum d'allongement proportionnel ; à partir de ce moment la résistance de la section, et, par conséquent la tension dans le barreau va en diminuant, c'est ce qui fait que, dans les aciers très doux, la charge de rupture peut n'être que la moitié de la charge maxima de résistance, l'allongement de striction continue toujours à se produire sous ces charges décroissantes.

Mais dans les autres sections du barreau, où la charge de maximum de résistance n'a pas été atteinte et, par suite, l'allongement maximum n'est pas dépassé, les molécules subissent des tensions de moins en moins grandes, les forces attractives augmentent et les distances diminuent, les sections du barreau augmenteront donc.

L'allongement final de striction dépend donc seulement de la ductilité de l'acier et est indépendant de sa résistance à la rupture.

Certains faits d'expériences semblent confirmer la théorie de Poncelet ; nous avons constaté, en effet, plusieurs fois dans des essais de traction, après la rupture, des renflements en certains points qui n'ont pu se produire que par suite du refoulement de la matière.

Il faut remarquer, dans ces phénomènes de la striction, que la section qui est réduite au plus petit diamètre, parce que la rupture s'y produit, est la seule pour laquelle les phénomènes d'allongement complet se produisent.

On peut donc espérer, par l'étude des allongements et des raccourcissements permanents de cette partie des tiges soumises soit à des efforts de traction, soit à des efforts de compression, trouver les éléments d'une théorie rationnelle de la déformation permanente, qui puisse s'appliquer aux phénomènes de la flexion et des chocs.

OPINION DE M. CONSIDÈRE. — M. Considère s'est demandé pourquoi une tige cylindrique, qui supporte en tous les points de ses différentes sections le même effort, ne continue pas à s'allonger régulièrement à partir de la charge de tension maxima, comme elle le faisait sous les charges précédentes.

Pourquoi, au contraire, la plus grande partie de l'éprouvette ne subit plus d'allongement, mais, en un point spécial, qu'une diminution très considérable de diamètre se produit et augmente régulièrement jusqu'à la rupture ?

M. Considère fait remarquer que, pendant toute la première période de tension, l'effort total que supporte l'éprouvette va toujours en augmentant, ainsi que l'allongement, mais, par suite, la section diminue ; ce qui revient à dire que la tension augmente plus rapidement que ne diminue la section.

La matière est donc en équilibre stable.

Si, en effet, par suite d'un manque d'homogénéité, une des sections tend à s'allonger plus que les autres, elle sera capable d'un effort total plus considérable, et par conséquent, elle cessera de diminuer jusqu'au moment où les autres sections de l'éprouvette, ayant supporté un allongement égal, seront toutes capables de subir le même effort total.

Dans toute cette période, il ne peut y avoir de striction.

Mais, à un certain moment, l'éprouvette est soumise à ce que nous avons appelé la *charge de tension maxima*. — L'expérience prouve que l'effort total est alors maximum, et qu'il va toujours en décroissant jusqu'à la rupture. La matière s'allongeant de plus en plus on voit que, dans cette seconde période, la tension croît moins vite que la section ne diminue.

La matière est donc en équilibre instable.

Si une section diminue plus qu'une autre, elle ne pourra plus opposer qu'une résistance inférieure à ses voisines.

L'équilibre sera ainsi rompu, la section se contractera de plus en plus ; l'effort

total diminuant, il ne pourra plus amener aucun changement de forme dans le restant du barreau qui restera sensiblement dans l'état où il se trouvait au moment de la *charge de tension maxima*.

« Si cette explication est exacte, la striction doit commencer, disait M. Considère, non pas à un moment quelconque, variable au hasard avec l'homogénéité du métal, comme on l'admet généralement, mais au moment où l'effort total atteint sa valeur maxima. »

Examinons maintenant si on doit conserver dans les essais l'étude de la striction.

Nous avons déjà exposé que beaucoup d'auteurs admettent que la densité du métal ne varie pas dans les essais à la traction, et que le volume de l'éprouvette reste constant ; il en résulte que les allongements doivent augmenter proportionnellement à la diminution de section ; l'allongement à la rupture variera donc dans le même sens que la striction.

Nous croyons toutefois devoir rappeler, comme nous l'avons déjà fait remarquer, que l'*allongement total à la rupture* est un composé complexe de l'allongement élastique, de l'allongement proportionnel et de l'allongement de striction, tandis que la striction est une mesure simple et unique qui n'offre rien de complexe ni de confus dans sa définition.

Il est nécessaire de rechercher quels sont les éléments, dans la construction des éprouvettes, qui peuvent faire varier les résultats donnés par la striction.

Influence de la variation simultanée des dimensions transversales et de la longueur

M. Barba a entrepris toute une série d'expériences sur ce sujet, avec des éprouvettes cylindriques, et, comme dans les tableaux qui les résument, il a noté les strictions, nous pouvons en tirer des résultats utiles.

Le rapport du diamètre à la longueur utile de l'éprouvette était de 7.24.

Diamètre des éprouvettes.	Longueur entre repères.	ACIER DOUX		ACIER DUR	
		Striction.	Allong. total de rupture pour 100.	Striction.	Allong. total de rupture pour 100.
m/m 6.90	m/m 50	0.307	% 32.8	0.635	20.0
10.35	75	0.310	32.2	0.620	18.8
13.80	100	0.303	33.0	0.626	18.2
17.25	125	0.314	33.5	0.616	18.1
20.70	150	0.308	33.6	0.682	18.0
24.15	175	0.303	33.2	0.642	18.1
27.60	200	0.322	33.0	0.656	19.5
31.05	225	0.305	34.0	»	»
	Moyennes.	0.308	33.3	0.639	18.6

On voit d'après ces chiffres que, pour l'acier doux, la différence entre la valeur maxima et minima est à peine de 3 % pour la striction et pour l'allongement total pour 100 à la rupture ; pour l'acier dur, cette différence est de 9,6 % pour la striction et 10 % pour l'allongement total à la rupture.

Si donc on admet la loi de similitude de M. Barba, il faut reconnaître qu'au point de vue de la striction elle se réalise aussi.

Influence de la longueur de l'éprouvette

Nous ne connaissons pas d'expériences spéciales sur cette question, mais, d'après ce que nous avons dit sur les causes de la striction, on comprend facilement que si la longueur de l'éprouvette est suffisante pour que l'écoulement de la matière puisse se faire librement, et il faut pour cela que la striction se trouve dans la partie médiane de l'éprouvette et ne soit pas influencée par les têtes, cette longueur sera seule nécessaire, et, à partir de cette limite, la striction sera indépendante de la longueur de l'éprouvette, ce qui sera un avantage considérable pour *l'allongement total à la rupture*.

Longueur de l'allongement de striction. — Il est évident que la longueur nécessaire de l'éprouvette dépend de l'allongement du métal, dans la période de la striction, que nous appellerons longueur de la striction (p. 211).

EXPÉRIENCES DE M. LE BASTEUR. — M. Le Basteur a essayé un grand nombre de barres d'acier, destinées à fabriquer des entretoises ; ces tiges cylindriques qui avaient 1^m,15 de long, ont été divisées en parties de 10 centimètres, et on a noté après rupture les allongements de chacune de ces parties.

La moyenne de ces allongements, sans compter la partie où s'est produite la striction, donne, pour l'exemple cité par M. Le Basteur, 12 mil. 5, c'est-à-dire que la longueur primitive de 100 millimètres est devenue 112 mil. 5. Si nous admettons que cet allongement est celui qui existait au moment où la striction a commencé, comme l'intervalle de 100 millimètres où la striction a eu lieu est devenu ensuite 124 millimètres, il en résulte que la longueur de la striction pour ce métal serait de 12 millimètres en nombre rond.

EXPÉRIENCES DE M. CONSIDÈRE. — Des expériences de M. Considère sur des éprouvettes de 200 millimètres, nous tirons les renseignements ci-contre :

	ALLONGEMENTS ENTRE REVIÈRES		Longueur de la striction
	Avant striction	Après striction	
	m/m	m/m	m/m
Barreaux en fer fin très doux.....	33.200	66.»	32.800
Barreaux en acier très doux.....	25.500	52.5	27.000

La longueur de la striction dépend donc beaucoup de la nature du métal, elle sera minima pour les métaux durs et maxima pour les métaux extra-doux.

Jusqu'à ce que des expériences directes aient démontré la longueur minima que l'on peut donner aux barrettes d'épreuve, il semble que les éprouvettes de 100 et surtout de 200 millimètres les plus employées, sont plus que suffisantes pour, qu'à partir de ces dimensions, on puisse admettre que la striction est indépendante de la longueur de l'éprouvette.

Influence de la section de l'éprouvette

Si on admet les deux propositions précédentes, que la striction dans certaines limites est indépendante de la longueur et ne varie pas quand le rapport de la section à la longueur est constant, il faut en déduire que la striction ne doit pas varier avec la section de l'éprouvette dans les mêmes limites, qui sont très suffisantes pour la pratique.

Voici à ce sujet quelques expériences :

EXPÉRIENCES DE M. BARBA. — Cet ingénieur a fait des expériences sur des éprouvettes de même métal, ayant même longueur, mais des diamètres très différents.

Diamètre des boulons.	Section primitive.	Charge de rupture par m/m ² .	Striction.	Allongement 0/0 sur 200.
m/m		k		
50		55	0.585	37.7
80	»	55	0.587	41.2

Cette expérience paraît donc donner tout à fait raison à notre proposition : Dans d'assez larges limites, plus que suffisantes pour la pratique, la striction est indépendante de la section.

C'est du reste aussi l'opinion de M. Considère.

Influence de la forme de la section

M. Barba a fait des expériences que nous avons déjà citées, qui nous permettent de résoudre cette question.

Avec le même métal, chaque barreau ayant subi le même corroyage, il a fabriqué des éprouvettes ayant la même section, mais de forme ronde, carrée ou rectangulaire. Voici le résultat de ses essais :

DÉSIGNATION DES FORMES DES SECTIONS.	Charge de rupture.	Striction.	Δ 0/0.	Allongem. total sur 200m/m	Δ 0/0.
Ronde	41.5	0.417	4.1	32.7	9.2
Carrée	41.7	0.427	1.8	33.7	6.3
Rectangle	39.6	0.435	»	36.0	»

On voit, en résumé, que la striction semble beaucoup moins sensible à la forme de la section que l'allongement.

EXAMEN DES DIFFÉRENTES CAUSES QUI PEUVENT FAIRE VARIER LES RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION.

De nombreux expérimentateurs ont étudié cette question si complexe.

Influence des têtes de l'éprouvette

M. Barba, comme nous l'avons déjà exposé, admet, d'après les expériences de M. Tresca, que les métaux ne sont pas pratiquement compressibles, et, par suite, que le volume de l'éprouvette reste constant. Il démontre cette perma-

nence du volume par des expériences directes faites à l'aéromètre de Nicholson.

En partant de cette hypothèse, il prouve, par des considérations théoriques que :

« Dans une barrette soumise à un effort de traction, tout allongement se traduisant par une réduction de section correspondante :

« 1^o Le barreau d'épreuve prend, par suite des têtes, un profil courbe au rectangle, qu'il prendrait après déformation si les têtes n'existaient pas ;

« 2^o La fibre centrale est la moins chargée, et conserve la plus grande épaisseur dans la partie correspondante au profil extérieur convexe ;

« 3^o Dans la région de raccordement entre les deux parties convexes, ou de tangence du rectangle précité, c'est-à-dire pendant la deuxième période de déformation, (période de la striction), la fibre centrale est de beaucoup la plus chargée et se rompt la première. »

Comparaison après rupture des diverses sections d'une même éprouvette

M. Marché a entrepris à ce sujet un essai d'un certain intérêt :

Il a soumis à un effort de traction, augmentant jusqu'à la rupture, une tige cylindrique d'acier ayant un diamètre de 15,2 millimètres, et une longueur utile entre repères de 96 millimètres, divisée, avant l'essai, par des coups de pointeau en quatre parties de 24 millimètres de longueur.

Après la rupture, qui eut lieu sous une charge de 50 kilog. 4 par millimètre carré de section primitive, la longueur totale de l'éprouvette était égale à 120 mil. 5; l'allongement proportionnel à la rupture était donc, d'après les errements habituels, de 25,5 %.

Les subdivisions de la tige présentaient les modifications ci-dessous indiquées :

	Longueur primitive.	Longueur	Δ	Prop. %.
		après rupture.		
1 ^{re} Division.	24	27	3	12.5
2 ^e —	24	28	4	16.7
3 ^e —	24	36	12	50 »
4 ^e —	24	29.5	5.5	23 »

Le diamètre de la tige n'est plus aux extrémités que de 14 mil. 7 et de 10 mil. 5 dans la section de rupture; le diamètre décroît d'une manière continue depuis les têtes jusqu'à la section de rupture.

Admettant alors la constance du volume, M. Marché recherche les allongements supportés par les différentes sections droites du cylindre primitif, pendant qu'il est soumis aux efforts de traction depuis les têtes jusqu'à la section de rupture, et il prouve que l'allongement de 25,5 % n'est que la moyenne d'une série continue d'allongements qui varie de 7 % à 110 %.

M. Marché a dressé les courbes représentant les allongements aux divers points de la tige, et celle des diamètres de cette tige en ces mêmes points.

Il remarque, sur chacun des deux tronçons de l'éprouvette, trois zones bien distinctes, en ce qui concerne les diamètres :

1^o *Zone d'attache.* — Les têtes, s'opposant par leur masse aux allongements et, par suite, à la réduction des sections, ces différences sont faibles.

Dans l'expérience précitée, cette zone s'étendait sur environ $\frac{1}{7}$ de la longueur de la tige, qui avait pris à peu près la forme d'un tronc de cône à périmètre légèrement curviligne, dont la grande base avait un diamètre de 14 mil. 7 et la plus petite base 14 millimètres.

2^o *Zone moyenne.* — Dans cette zone, toutes les sections décrivées ont subi à peu près des allongements identiques, et, par suite, la forme est restée cylindrique. L'étendue de cette zone dépend de la longueur de la tige.

3^o *Zone de striction.* — Dans cette partie, les allongements, et, par suite, les variations de diamètre sont au contraire considérables, et varient, dans le cas dont il s'agit, de 21 à 110 %. Cette zone est fonction de la qualité de l'acier et des dimensions transversales de l'éprouvette.

Il est regrettable que, dans ces expériences, la longueur primitive soit aussi faible, car la zone moyenne, qui a tant d'intérêt pour l'étude des charges de résistance maxima, est difficile à bien observer.

Continuant ses recherches, M. Marché en a tiré des conclusions qu'il est bon de noter.

L'étendue de la 1^{re} et de la 3^e zone :

1^o Reste constante pour le même acier et les mêmes diamètres d'éprouvettes; elle varie peu avec la longueur de l'éprouvette;

2^o Est proportionnelle aux diamètres des tiges;

3^o La longueur de la 1^{re} zone, zone d'attache, croît avec la douceur de l'acier;

4^o La longueur de la 3^e zone, zone d'étranglement et de rupture, est au contraire d'autant plus courte que l'acier est plus doux.

EXPÉRIENCES DE M. BARBA. — M. Barba a opéré des expériences analogues sur une éprouvette de section rectangulaire, qu'il avait eu soin de quadriller en petits carrés de 5 millimètres de côté.

La longueur utile de l'éprouvette était de 105 millimètres ; après rupture, la longueur était devenue de 145 mil. 6.

M. Barba a étudié les variations du rapport $\frac{l}{e}$, de la longueur à l'épaisseur.

Il a conclu de ces observations :

1^o Le rapport primitif entre la largeur et l'épaisseur est resté le même dans la région voisine du milieu, mais en dehors de la striction : les sections successives dans cette région restent donc semblables à elles-mêmes et à leur forme initiale ;

2^o Dans la partie de la striction, il n'est plus rigoureusement le même, mais peut être considéré comme invariable, malgré cela, eu égard aux difficultés et erreurs de mesurage qu'on ne peut éviter dans une partie aussi déformée ;

3^o Dans le voisinage des têtes, ce même rapport n'existe plus.

Influence de la variation simultanée des sections transversales et de la longueur

LOI DE SIMILITUDE DE M. BARBA. — M. Barba a fait faire pour des aciers durs et doux tout une série d'éprouvettes, dans lesquelles le rapport de la longueur au diamètre était constant et égal à 7,24.

Aciers doux. — 8 Essais

	RÉSISTANCE		ALLONGEMENT	
	k.	Δ %.	%	Δ %
Limite d'élasticité. . . .	Max. 24.2 Min. 23.8	1.65	»	Δ %
A la rupture.	Max. 42.2 Min. 40 »	5.21	Max. 34 » Min. 32.8	3.52

Acier dur, — 7 Essais

	RÉSISTANCE		ALLONGEMENT	
	k.	Δ %	%	Δ %
Limite d'élasticité . . .	Max. 40.6 Min. 32.7	19.70	»	Δ %
A la rupture	Max. 64.9 Min. 62 »	4.46	Max. 20 » Min. 18 »	10 »

M. Barba déduit de ces essais la loi de similitude suivante :

« Des éprouvettes d'essais de même matière, et semblables dans leurs dimensions, se comportent de même dans les essais à la traction, au point de vue des charges, à la limite d'élasticité et à la rupture de l'allongement pour 100. »

Différents ingénieurs admettent comme exacte cette loi de similitude, et la Compagnie de l'Est, par exemple, s'en est servie pour établir ses cahiers des charges.

MM. Le Basteur et G. Marié ont entrepris des essais analogues sur cette question, et sont arrivés à des résultats comparables à ceux de M. Barba.

Influence de la section transversale des barreaux d'épreuve.

EXPÉRIENCES DE LA STAATSBAHN. — La Staatsbahn a publié, pour l'Exposition universelle de 1878, un travail très remarquable sur les essais de résistance des fontes, fers et aciers, de son usine de Reschitzta.

Les ingénieurs de cette Compagnie ont essayé des éprouvettes de 36 et 28 millimètres de diamètre, découpées aux outils dans des blocs de métal, et, pour chacune de ces deux sortes d'éprouvettes, 6 en acier Martin et 5 en acier Bessemer.

Les longueurs utiles d'éprouvettes étaient variables : 4^m,600 et 0^m,400, mais on a prélevé les allongements pour 100 sur 250 millimètres de longueur comprenant la striction.

Des chiffres relevés dans ces essais, il résulte :

1^o Que la charge de rupture par millimètre carré de section augmente quand la section transversale diminue, et réciproquement ;

2^o Que les allongements pour 100 augmentent quand la section transversale diminue, et réciproquement.

EXPÉRIENCES DE M. KIRKALDY. — M. Kirkaldy a publié, en 1866, des essais des plus intéressants, desquels nous extrayons l'expérience suivante :

Dans une barre de fer de Govare de 38,1 millimètres de diamètre, on a pris 4 morceaux qui, après rechauffage, ont été étirés aux diamètres de 31,75 millimètres, 25,4 millimètres, 19,05 millimètres, 12,7 millimètres.

A la traction, on a obtenu les résultats ci-dessous :

ÉPROUVESES. DIAMÈTRE.	RÉSISTANCE TOTALE.	ALLONGEMENT %.
m/m		
31.75	56.869	28.3
25.40	57.369	26.7
19.05	58.190	25.2
12.70	59.708	23.8

De ces essais, on pouvait donc conclure :

- 1° La résistance à la rupture augmente quand le diamètre diminue ;
- 2° Les allongements pour 100 diminuent avec le diamètre.

EXPÉRIENCES DE M. BARBA. — M. Barba a entrepris une série d'essais sur cette question. Il a pris un barreau d'acier qu'il a découpé en éprouvettes de longueur constante, mais dont les diamètres étaient successivement 5 millimètres, 10 millimètres, 20 millimètres.

Les résultats ont été :

ACIER DOUX			
DIAMÈTRE des éprouvettes.	LIMITE d'élasticité.	CHARGE de rupture par m/m ² .	ALLONGEMENT %
20 m/m	25 ⁴ .0	37 ⁴ .0	37.5 %
10	24 8	36 9	30.2
5	25 2	37 6	25.0

ACIER DEMI-DUR			
DIAMÈTRE des éprouvettes.	LIMITE d'élasticité.	CHARGE de rupture par m/m ² .	ALLONGEMENT %
20 m/m	34 ⁴ .5	59 ⁴ .3	25.0 %
10	33 5	59 4	21.»
5	33 »	60 »	17.»

Expériences faites en 1875 sur des boulons de blindage en acier.

DIAMÈTRE DES BOULONS	Charge de rupture par m/m ² .	Rapport de la section rompue à la section primitive.	ALLONGEMENT %.		
			Sur 100.	Sur 200.	Sur 300.
16 m/m	»	»	25.0	»	»
50 m/m	55 k.	0.585	46.5	37.7	29.6
80 m/m	55 k.	0.587	55.0	41.2	34.6

On voit d'après ces essais que :

1° Les charges à la limite d'élasticité et de rupture, et la striction ne sont nullement influencées par la variation de la section transversale des éprouvettes de même longueur;

2° L'allongement %, au contraire, progresse considérablement avec l'augmentation de la section de l'éprouvette.

La troisième série d'essais montre toutefois que cette influence diminue beaucoup, au fur et à mesure que la longueur de l'éprouvette augmente.

En effet, pour :

Une éprouvette de 100 millimètres, l'écart est de 8,5 %

Id.	200	id.	id.	3,5
Id.	300	id.	id.	5,0

« On voit donc, dit M. Barba, que l'allongement % indiqué ou demandé pour un métal n'a aucune valeur, si, en regard de cet allongement, on ne mentionne pas le diamètre du barreau d'épreuve, puisqu'on peut doubler, tripler.... l'allongement en augmentant démesurément le diamètre de l'éprouvette. »

Ces résultats sont en contradiction avec ceux de M. Kirkaldy.

Influence de la longueur des éprouvettes.

EXPÉRIENCES DE W. FAIRBAIRN. — Le célèbre ingénieur anglais W. Fairbairn a entrepris de nombreuses expériences sur les fers à rivets, il a rendu compte des résultats dans son ouvrage « *Useful Information for Engineers, 2^e series* ».

Pour étudier l'influence de la longueur des barrettes sur l'allongement %, W. Fairbairn a soumis à la machine d'essai 5 éprouvettes de longueur variable.

L = Longueur des éprouvettes exprimée en pouces anglais.	Allongement total exprimé en pouces anglais.	$l =$ Allongement par unité de longueur.
120 = 3 ^m 04	26.0	0.216
42 = 1.06	9.8	0.233
36 = 0.91	8.8	0.244
24 = 0.61	6.2	0.258
10 = 0.25	4.2	0.420

M. Fairbairn a résumé ces essais dans la formule suivante :

$$l = 0.180 + \frac{2.5}{L}$$

qui relie la longueur de l'éprouvette à l'allongement par unité de longueur.

Si on suppose L exprimé en mètres et l en % de la longueur primitive, la formule deviendrait :

$$l = 18 + \frac{6.350}{L}$$

Il est bien évident, du reste, que ces deux constantes ne peuvent avoir de valeur que pour les fers à rivets essayés par M. W. Fairbairn ; pour des fers ou des aciers d'une autre nature, elles seraient tout à fait différentes.

EXPÉRIENCES DE M. JOËSSEL. — M. Joëssel, ingénieur de la Marine, a publié en 1872, dans le *Mémorial du Génie maritime*, un travail considérable sur des essais faits à Indret, en 1870 et 1871, sur les fontes et les aciers.

Pour se rendre compte de l'influence de la longueur de l'éprouvette sur les coefficients de résistance et d'allongement du métal, il a pris, pour le fer, des barreaux de 20 millimètres de diamètre faits au tour.

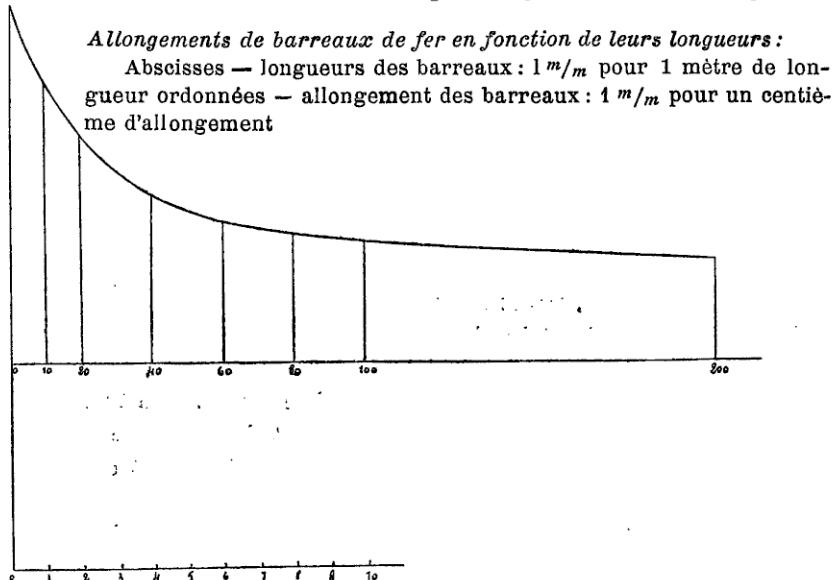
Les parties rondes étaient raccordées aux têtes carrées par des congés calibrés.

Entre ces congés les éprouvettes avaient une longueur uniforme de 200 millimètres.

Dans le tableau qui résume ces essais, M. Joëssel a, comme d'habitude, exprimé les résistances en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive, et les allongements en % de la longueur des barreaux entre les congés.

DÉSIGNATION DES PRODUITS ET MODE D'OPÉRER	Longueur des barreaux entre les congés en m/m.	Résistance de rupture.	Allongement 0/0.
	m/m	k	0/0
Barreaux de fer doux avec congés rompus à la vitesse ordinaire 40 à 50" par barreau.	10	35.06	78.»
	20	32.44	64.»
	40	32.96	44.5
Tous les barreaux ont cassé entre les congés.	80	32.96	36.83
	100	31.92	32.66
	200	32.34	28.33

« Il résulte de ce tableau, dit M. Joëssel, que la longueur des barreaux a peu d'influence sur leur résistance à la rupture, mais en a beaucoup sur leurs allongements % ; ceux-ci diminuent lorsque la longueur des barreaux augmente.



« Si, avec les nombres observés on trace une courbe, ayant pour abscisses les longueurs des barreaux et pour ordonnées les allongements, on obtient une ligne très régulière, convexe vers l'axe des abscisses, qui s'abaisse d'abord rapidement, et tend à devenir parallèle à cet axe pour le barreau ayant 200 millimètres de longueur. On peut conclure de là que les résultats donnés par des barreaux qui ont des longueurs différentes, mais égales ou supérieures à 200 millimètres, sont néanmoins comparables entre eux. »

Les essais de M. Joëssel peuvent se représenter par une formule analogue à celle de W. Fairbairn :

$$l = a + \frac{b}{L}$$

Les constantes qui satisfont aux résultats, sauf pour la première éprouvette, sont :

$$a = 24.825 \quad b = 783.5$$

ce qui nous donne :

$$l = 24.825 + \frac{783.5}{L}$$

Si nous admettons que les constantes s'appliquent encore pour des valeurs de L plus grandes que 200 millimètres, nous aurons pour :

$L = 100$	$l = 32.66$	Δ
$L = 200$	$l = 28.83$	3.33
$L = 300$	$l = 27.44$	0.89
$L = 400$	$l = 26.78$	0.66

On voit qu'à partir de $L = 200$ les erreurs que l'on commet sur les allongements, par rapport à la longueur de l'éprouvette, sont relativement faibles.

Les considérations de M. Joëssel seraient donc de la plus grande importance, si elles étaient vérifiées, pour des métaux d'une autre nature que celui essayé.

ESSAIS DE M. LE PROFESSEUR BAUSCHINGER. — Cet éminent professeur a entrepris, dans son laboratoire de l'Ecole polytechnique de Munich, les plus remarquables expériences sur la résistance des métaux.

Pour étudier l'homogénéité de la matière et la résistance à la traction des fers, il opéra sur des barres de 4^m,250 de longueur et de 0^m,0249 de diamètre. Les barres étaient divisées sur leur longueur en 17 parties de 25 centimètres numérotées de 0 à 17.

M. Bauschinger a noté avec le plus grand soin les diamètres et les allongements, après rupture, de ces diverses sections ; nous donnons le relevé général pour deux de ces expériences.

En examinant ces chiffres, on remarquera :

1^o Que dans les deux essais, sauf aux environs de la section de rupture, et, pour le fer à nerf, dans certains points particuliers dus peut-être à des défauts d'homogénéité, le volume de chaque portion de la tige varie peu par rapport au volume primitif, 1 à 2 % en moins, ce qui confirme les expériences scientifiques de Wertheim, etc. ;

NUMÉROS des divisions.	FER A NERF			FER A GRAIN FIN		
	Sections après rupture.	Longueur entre repér. après rupt. en m/m.	Volume après rupture.	Sections après rupture.	Longueur entre repér. après rupt. en m/m.	Volume après rupture.
0	455	291	0.132	446	330	0.147
1	434	277	0.120	407	284	0.115
2	444	275	0.122	441	273	0.120
3	444	276	0.122	447	269	0.120
4	440	278	0.122	453	267	0.120
5	440	286	0.125	458	264	0.120
6	418	291	0.121	458	266	0.121
7	418	304	0.127	458	264	0.120
8	416	296	0.123	458	263	0.120
9	418	333	0.139	462	262	0.121
10	Rupture. 389	308	0.119	462	263	0.121
11	872	314	0.116	462	262	0.121
12	391	297	0.116	462	262	0.121
13	426	283	0.120	462	261	0.120
14	440	282	0.124	462	260	0.120
15	426	285	0.121	462	260	0.120
16	425	287	0.121	466	259	0.120
17	429			466		
Dimensions primitives	487 m/m ²	250 m/m	0.122	487 m/m ²	250 m/m	0.122
Rupture à		3 380 k.			3 390 k.	
Contraction pour 0/0..		52.2			52.4	
Allongement pour 0/0..		16.9			7.6	

2° Le volume de la portion de 0^m.250 de la tige où a lieu la rupture, présente, au contraire, une augmentation considérable de volume, 14 % pour le fer à nerf, 20 % pour le fer à grain fin qui, du reste, a cassé dans le voisinage de la tête.

Ces résultats seraient donc en contradiction avec ceux de M. Barba que nous avons déjà cités, et qui admet que le volume reste constant, même après rupture ;

3° Les tiges, sur toute leur longueur, diminuent le diamètre ; si nous laissons de côté les sections de 0^m,250 de la tige où s'est produite la rupture, nous voyons que, par rapport à la section primitive, il y a eu les diminutions suivantes :

	FER A NERF	FER à grains fins.
Diminution minima %	6.69	4.31
Diminution maxima %	23.61	9.44

Si, au contraire, nous prenons les sections des tiges dans les parties où le volume est resté sensiblement constant, c'est-à-dire pour lesquelles les diminutions de sections sont proportionnelles aux allongements linéaires, soit de 2 à 5 pour le premier essai, de 9 à 13 pour le deuxième essai, nous aurons comme différence pour %, par rapport à la section primitive :

	1 ^{er} ESSAI		2 ^e ESSAI	
	Section moyenne après rupture.	Δ 0/0.	Section moyenne après rupture.	Δ 0/0.
Divisions de 2 à 5	442	9.2	»	»
Divisions de 9 à 13	»	»	462	5.1

On voit les erreurs considérables que l'on peut commettre au détriment des métaux doux et malléables, en rapportant la charge maxima de résistance ou les charges de rupture à la section primitive des pièces ;

4° Si nous examinons l'allongement % qu'a subi cette éprouvette, nous trouvons que la moyenne est de 16,9 % pour le premier essai et 7,6 pour le deuxième. Mais, si nous supposons que nous considérons les parties de 0^m,250 qui comprennent la section de rupture et qui l'entourent, nous arrivons aux résultats ci-contre :

	LONGUEUR SUPPOSÉE DE L'ÉPROUVE TTE			
	4=25	0=250	0=500	1=000
1 ^{er} Essai. — Allongement %.....	16.9	33.4	28.35	25.3
2 ^e Essai. — Allongement %.....	7.6	32.1	22.9	15.7

Il paraîtra au moins bizarre d'avoir autant de chiffres différents pour représenter la même propriété physique du même métal.

FORMULE PROPOSÉE PAR M. V^{or} DESHAYES. — M. Deshayes, ingénieur des Aciéries de Terre-noire, a proposé la formule suivante qu'il déduit d'un grand nombre d'essais entrepris pendant plusieurs années à Terre-noire.

Si on appelle :

$$\begin{array}{l} \alpha \text{ l'allongement \% mesuré sur 200 millimètres.} \\ \alpha' = \frac{\alpha}{100} \\ \alpha_1 = \frac{9}{10} \alpha \end{array}$$

On a :

$$\alpha' = \alpha \left(1 + \frac{1}{100} \right)$$

$$\alpha_1 = \frac{9}{10} \alpha$$

EXPÉRIENCE DE M. LE BASTEUR À LA COMPAGNIE DE P.-L.-M. — M. Le Basteur, ingénieur à la Compagnie de P.-L.-M., a publié de très intéressantes expériences à ce sujet.

Il a pris des barres cylindriques en acier destinées à faire des entretoises de foyers de locomotives ; elles avaient 1^m,15 de long et furent divisées par des coups de pointeau très légers en parties de 100 millimètres de longueur, sauf la dernière qui était seulement de 50 millimètres.

Ces barres furent rompues par une machine d'essais à la traction, et on mesura avec grand soin les allongements de chacune des subdivisions :

	LONGUEUR primitive.	LONGUEUR après rupture.	Δ
1 ^{re} Division	100 m/m	111 m/m	11 m/m
2 ^e »	100	111	11
3 ^e »	100	112	12
4 ^e »	100	113	13
5 ^e »	100	113	13
6 ^e »	100	111	11
7 ^e »	100	124	24
Rupture.			
8 ^e »	100	115	15
9 ^e »	100	114	14
10 ^e »	50	56	6

La rupture de la barre et, par suite, la striction, s'était produite dans le septième intervalle, plus près du huitième que du sixième ; c'est, en effet, dans cet intervalle de 200 millimètres que les allongements maxima de 24 millimètres et de 15 millimètres se sont produits ; dans les autres, au contraire, il y a une régularité assez notable.

M. Le Basteur fait remarquer, avec raison, que si on prend l'allongement proportionnel, après rupture, sur :

- 1^e La longueur de la barre 1^m,15, l'allongement est de 13,63 %
- 2^e Sur 200 m/m comprenant la striction — 19 %
- 3^e Sur 100 — — 24 %

EXPÉRIENCES DE M. KIRKALDY. — Cet éminent ingénieur a entrepris des essais de même nature pour étudier l'influence de la longueur de l'éprouvette sur l'allongement proportionnel à la rupture. Voici sa conclusion :

« Afin de déterminer si les barreaux s'allongent également sur toute leur longueur, la distance entre les coups de pointeau extrêmes a été divisée en demi-pouces : à quelques exceptions près, on a trouvé un même accroissement de longueur d'un bout à l'autre du barreau jusqu'à un point très rapproché de la charge de rupture : à ce moment, il se produit plus ou moins brusquement une striction en un point, quelquefois en deux points, dans quelques cas exceptionnels, en trois points différents. »

EXPÉRIENCES DE M. FERDINAND GAUTIER. — Dans son travail sur les constructions en acier, M. Ferdinand Gautier cite toute une série d'expériences des plus intéressantes, faites en 1870, sur des aciers pour canons.

Ces aciers étaient de natures très différentes, puisque, comme le montre le tableau ci-dessous, pour une même longueur d'éprouvette, 200 millimètres par exemple, l'allongement % variait de 10 à 25 %.

Allongements pour 100 mesurés sur

20 CENT.	15 CENT.	10 CENT.	5 CENT.	NOMBRE D'ESSAIS
25	27.0	30.5	40.3	9
24	26.7	30.0	40.0	10
23	25.7	29.2	38.0	10
22	24.1	28.1	38.0	10
21	24.0	28.0	35.6	10
20	22.9	26.6	35.2	10
19	21.4	25.0	32.1	10
18	20.2	24.4	29.9	10
17	19.3	22.6	28.5	10
16	17.9	20.7	25.4	10
15	17.2	20.6	25.0	10
14	16.0	18.5	24.5	10
13	14.8	17.6	22.2	10
12	13.6	15.2	19.0	10
11	12.7	14.7	18.6	10
10	11.3	12.7	15.7	6

On voit que, pour un même acier, suivant que l'éprouvette aura 200 millimètres ou 50 millimètres de longueur, l'allongement % sera de 25 à 40 % — 18 à 29,9 % — 10 à 15,7 %.

M. Gautier remarque que la formule

$$\Delta = \alpha + \frac{b}{l}$$

dans laquelle Δ représente l'allongement %, l la longueur de l'éprouvette, α et b des constantes, serait assez d'accord avec les faits, à condition que α et b aient des valeurs différentes suivant chaque nature d'acier.

Cette formule n'est, du reste, que celle proposée par Fairbairn.

FORMULE DE M. MARCHÉ. — M. Marché, dans son mémoire déjà cité, a cherché à établir une formule donnant la valeur de l'allongement en fonction du diamètre de l'éprouvette, de la longueur de la tige et de la nature de l'acier dé-

finie par l'allongement de la partie de l'éprouvette qui n'est soumise ni à la striction, ni à la perturbation des têtes, et qu'il a appelé la zone moyenne.

En se reportant à la page 219, on trouvera la définition des différentes zones dont s'est préoccupé M. Marché et on comprendra parfaitement les notations ci-dessous.

Si on appelle :

- l_1 — La longueur primitive des zones d'attache, Δ_1 l'allongement moyen produit dans ces parties de la tige.
- l_2 — La longueur primitive de la zone moyenne, Δ_2 l'allongement correspondant.
- l_3 — La longueur de la zone d'étranglement, Δ_3 l'allongement moyen correspondant.
- l — La longueur totale de l'éprouvette, Δ l'allongement proportionnel à la rupture.

On a :

$$\begin{aligned} l_1 \Delta_1 + l_2 \Delta_2 + l_3 \Delta_3 &= l \Delta, \\ l_2 &= l - l_1 - l_3. \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} l_1 \Delta_1 + l_3 \Delta_3 + l \Delta_2 - (l_1 + l_3) \Delta_2 &= l \Delta \\ \Delta &= \Delta_2 + \frac{l_1 \Delta_1 + l_3 \Delta_3 - (l_1 + l_3) \Delta_2}{l} \end{aligned}$$

M. Marché, admettant que l_1 et l_3 sont proportionnels au diamètre primitif d de la tige, il obtient :

$$(1) \quad \Delta = \Delta_2 + m \frac{d}{l}$$

Dans l'exemple que nous avons cité, p. 218, et qui a servi à M. Marché à établir cette formule, on a :

$$\Delta_2 = 18 \quad \text{et } m = 47.5$$

et l'équation deviendrait :

$$\Delta = 18 + 47.5 \frac{d}{l}$$

Les hypothèses de M. Marché ne sont certainement pas absolument exactes, et cette formule n'est vraie que pour la nature des aciers que M. Marché a étudiés ; les constantes Δ_2 et m peuvent prendre des valeurs très différentes suivant qu'on opère sur des aciers durs ou doux. M. Marché a eu toutefois une idée ingénieuse en introduisant justement dans sa formule un coefficient Δ_2 qui est une des déterminantes des propriétés physiques de l'acier.

ESSAIS DE M. E. CORNUT. — D'après tous les renseignements que nous venons d'indiquer, on voit que les différents expérimentateurs ont dû bien vite abandonner la pensée de trouver, pour les fers et les aciers, une formule reliant d'une façon absolue les longueurs de l'éprouvette et les allongements totaux à la rupture dans les essais de traction, quelle que soit la qualité du métal dur ou doux et quelle que soit l'usine de fabrication.

Certains auteurs ayant fait un grand nombre d'expériences sur les produits

d'une même usine, ont donné des formules approximatives s'appliquant exclusivement à ces métaux et reconnaissant, du reste, qu'il fallait modifier les constantes de la formule pour les métaux de la même usine mais de qualités physiques différentes.

Je crois même que ces formules ne sont plus exactes en pratique lorsqu'il s'agit d'un métal de même nature, fabriqué par une même usine mais à des époques différentes.

J'ai entrepris un assez grand nombre d'essais à ce sujet, sur des tôles d'acier doux Martin, pour générateurs, fabriquées par la même usine à différentes époques; les éprouvettes de mêmes dimensions avaient été préparées par le même constructeur et cassées sur la même machine par le même personnel.

Toutes les tôles d'acier avaient satisfait aux conditions de résistance et d'allongement imposées par le cahier des charges.

Il est bien évident que si la relation qui lie l'allongement l à la rupture, à la longueur de l'éprouvette L était, comme on l'a proposé, de la forme

$$l = a + \frac{b}{L}$$

a et b étant des constantes, cela reviendrait à dire que pour deux valeurs de L , 200 millimètres et 100 millimètres par exemple, les différences des allongements % devraient être constantes.

Voici les résultats de nos essais :

Tôles de 10 m/m et 11 m/m.

	Nombre d'éprouvettes cassées.	Résistance à la rupture.	ALLONGEMENT % A LA RUPTURE		Δ
			sur 200m/m	sur 100m/m	
Essais du 19 avril 1890	4	36 k.	28.7	37.2	8.9
» 5 » »	6	37	30.2	36.5	6.3
» 18 nov. 1889	5	36.5	29.7	37.8	8.1
» » »	7	36.7	29.8	38	8.2
» » »	13	37	30.1	38	8.1
» 16 oct. »	6	37.2	29.7	37.2	7.5
» 11 sept. »	20	36.6	30.1	36.6	6.5
» 9 août »	15	36.3	30.5	35.6	5.1
» » »	5	36.7	30.3	38	7.7
» 9 juillet »	19	36.3	30.7	37.8	7.1
» 25 juin »	13	37.3	30	36.2	6.2
» 18 mai »	8	37	30.7	38.3	7.6
» 14 » »	4	36.6	31	38.5	7.5
» 9 février »	2	36.6	31	36	5 »

Tôles de 14 m/m.

	Nombre d'éprouvettes cassées.	Résistance à la rupture.	ALLONGEMENT % A LA RUPTURE		Δ
			sur 200m/m	sur 100m/m	
Essais du 12 sept. 1889	12	36.6	30.7	38.6	7.9
» 9 août 1889	7	36.3	29.9	38	8.1

Tôles de 16 m/m.

	Nombre d'éprouvettes cassées.	Résistance à la rupture.	ALLONGEMENT % A LA RUPTURE		Δ
			sur 200m/m	sur 100m/m	
Essais du 19 avril 1890.....	3	36.4	28	38.3	10.3
» 5 » »	3	36.9	30.1	37 »	6.9
» 30 oct. 1889.....	7	37.2	32	40.1	8.1
» 18 mai »	4	37.6	30.4	38 »	7.6

Si on examine les colonnes 2 et 3 de ces tableaux, on observera la régularité très remarquable de la fabrication de ces tôles, dont les livraisons se sont échelonnées sur près de quinze mois, et pourtant les différences des allongements sont loin de rester constantes.

Nécessité de fixer une longueur commune d'éprouvette

Toutes les observations, que nous venons de présenter, montrent suffisamment que si l'on veut avoir des essais comparables, il faut fixer une longueur commune pour l'éprouvette type à employer dans les essais suivant, bien entendu, les différentes formes des pièces soumises aux expériences.

Cette résolution est d'autant plus nécessaire que l'on est aujourd'hui dans le chaos le plus extraordinaire sur cette question, comme le prouve le tableau que nous publions.

Tableau donnant la longueur utile de l'éprouvette employée dans certains pays et par un certain nombre d'expérimentateurs

FRANCE . . .	Génie Maritime	200 m/m
	Ministère des Travaux publics.	200 »
	Ministère de la Guerre.	100 »
ANGLETERRE . .	Board of trade.	254 »
	Amirauté Anglaise.	203,2 »
	Lloyd's Register.	203,2 »
	Bureau Veritas.	203,2 »
	Whitworth.	50 »
BELGIQUE . . .	Ministère des Travaux publics.	250 »
	Usines de Couillet.	220 »
ALLEMAGNE . .	Union des Chemins de fer allemands.	200 »
	Réunion de Munich.	200 »
SUISSE . . .	École Polytechnique de Zurich.	200 »
	Barrow	50,8 »
	Bauschinger.	150 — 200 — 250
	Bauschiner.	400 »
	Staatsbahn.	100 — 200
	Usines de Reschitz.	250 »
	Jerkontoret.	200 »

Influence des formes générales des éprouvettes

ESSAIS DE M. E.-J. REED. — M. E.-J. Reed, constructeur en chef de l'amirauté anglaise, a publié des essais entrepris à l'arsenal de Woolwich, pour juger de l'influence de la forme de l'éprouvette sur la résistance et l'allongement à la rupture.

Au moment où l'emploi de l'acier commença à se répandre dans la construction des navires, l'Amirauté anglaise exigea que les barreaux d'épreuves eussent une largeur uniforme sur une longueur de 150 millimètres. Avant que cette règle ne fût imposée, les constructeurs anglais avaient, en effet, pour règle, de réduire la bande à la largeur demandée par des arcs de cercle (fig. 1).

FIG. 1



Essais des tôles d'acier avec entailles circulaires et rectangulaires

LONGUEUR DE L'ENTAILLE.	Largeur. Hauts- seurs.	Largeur. m/m	m/m	m/m	Température de la salle d'épreuve. ° Fahr. R C	DIMENSIONS			RÉSISTANCE TOTALE à la rupture			RÉSISTANCE à la rupture par m/m ²			Allongement en centièmes			OBSERVATIONS			
						R	C	Fahrt	R	C	R	R	C	R	C	R	C	R	C		
200	13	25.7	334	69	69	19.690	21.815	58.950	65.317	7	12	Rompus à l'un des angles.								Rompus au milieu.	
175	13	25.4	330	65	65	20.770	22.070	62.935	63.868	10.5	11	1 au milieu, 2 à un angle.								id.	
150	13	25.7	334	65	65	21.475	22.100	64.296	66.158	16.5	9	1 au milieu, 2 près du milieu.								id.	
125	13	25.7	334	65	66	19.561	22.239	58.567	66.588	5.5	10.5	Tous à un angle.								id.	
100	13	25.7	334	66	66	21.523	23.000	64.440	68.880	10	9	Tous à un angle.								id.	
75	12.7	25.4	323	72	71	20.465	22.000	63.354	68.076	14.5	5.5	2 au milieu, 1 à un angle.								1 près du milieu, 2 au milieu.	
50	13	25.7	334	67	69	21.770	23.175	65.187	69.390	16	8	2 au milieu, 1 à un angle.								1 près du milieu, 2 près du milieu.	
25	13	25.4	330	71	71	22.200	24.275	67.275	73.555	8.5	3	1 près du milieu, 2 à un angle.								Tous trois près du milieu.	

Cette disposition limitait la possibilité de la rupture à une longueur très restreinte.

M. E.-J. Reed prit une tôle d'acier qu'il découpa en bandes ayant 57 millimètres de largeur ; il ramena ces largeurs à 25 millimètres dans la partie destinée à recevoir la section de rupture, et les raccords entre les deux largeurs étaient faits, dans une série, par des arcs de cercle (fig. 2), dans une autre série, par des entailles carrées (fig. 3).

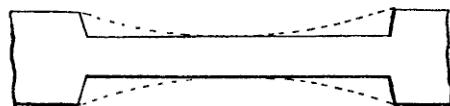


FIG. 2

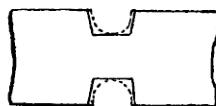


FIG. 3

La longueur de la partie rectiligne de 25 millimètres de largeur, a varié de 200 millimètres à 25 millimètres. On a essayé pour chaque éprouvette de longueur rectiligne déterminée dans ces limites, trois éprouvettes à raccords rectilignes et trois éprouvettes à raccords curvilignes.

Le tableau page 236 résume ces intéressants essais.

M. Reed en tire les conclusions suivantes :

« On verra que dans ces épreuves qui furent conduites avec le plus grand soin, le même métal cassa sous un effort notablement moindre quand il était réduit à une largeur uniforme que quand l'amincissement n'avait lieu qu'en un point. En comparant les barreaux ramenés à une largeur uniforme sur une longueur de 20 centimètres ou sur une longueur de 25 millimètres seulement, on verra que la résistance apparente s'est élevée d'une moyenne de 19 kil. 690 à une moyenne de 22 kil. 200, et, si nous comparons le premier cas avec le cas de la réduction par l'arc de cercle sur la moindre longueur, la différence est de 19 kil. 690 à 24 kil. 275. Ces faits d'expérience montrent l'importance de la préparation des bandes d'acier pour les essais de traction, si l'on veut obtenir des résultats comparables. Des expériences analogues ont été faites avec tôles de fer et ont montré que les mêmes différences se produisaient, suivant la manière dont la bande est taillée. »

EXPÉRIENCES DE M. KIRKALDY. — Cet éminent ingénieur a opéré de très nombreux essais pour démontrer la nécessité de donner une certaine longueur à l'éprouvette dont on suppose, bien entendu, la section régulière.

Sur des éprouvettes cylindriques, M. Kirkaldy faisait, au tour, des rainures circulaires, et, dans tous les cas, les charges de rupture par millimètre carré augmentaient, mais la striction diminuait.

M. Kirkaldy croit que cette rainure ainsi pratiquée met obstacle au développement de la striction.

EXPÉRIENCES DE M. JOËSEL. — M. Joëssel, ingénieur de la Marine, a publié dans le *Mémorial du Génie Maritime*, année 1872, un travail des plus

intéressants, sur la classification des métaux, d'après leur allongement et leur résistance à la rupture dans les essais de traction.

DÉSIGNATION DES PRODUITS ET MODE D'OPÉRER	Longueur des barreaux entre les congés en m/m.	Résistance de rupture.	Allongement en centièmes.
Barreaux de fer doux avec congés, rompus à la vitesse ordinaire 40" à 50" par barreau. — Rompus entre les congés	10 m/m	k	78 0/0
	20	35.06	64
	40	32.44	44.5
	80	32.96	36.83
	100	32.96	32.66
	200	32.44	28.83
Même fer, à angles vifs, rompus à la vitesse ordinaire. — Entre les congés	200	31.92	28.91
Acier fondu Jackson. — Barreaux avec congé, rompus à la vitesse ordinaire entre les congés	100	83.10	13.50
	200	83.15	9.33
Même acier, à angles vifs, vitesse ordinaire. — Rompus dans un angle . . .	100	59.75	4.49
	200	56.95	3.25

M. Joëssel fait remarquer qu'il résulte de ces chiffres : « que la forme des barreaux à leurs extrémités n'a qu'une faible influence sur les résultats observés dans les essais à la traction lorsqu'il s'agit de barreaux en fer. Avec les angles vifs même, les barreaux de ce métal n'ont pas cédé aux raccordements des parties rondes et carrées. Les barreaux d'acier, au contraire, ont tous rompu en ces points, et de leurs courbes de ténacité il résulte que leur résistance vive de rupture a été diminuée, par le fait des angles vifs, dans le rapport de 4, 2 à 1, c'est-à-dire de plus des trois-quarts. »

EXPÉRIENCES DE M. BARBA. — M. Barba rend compte, dans l'ouvrage que nous avons déjà cité, des expériences qu'il a faites sur l'influence des entailles et qui concordent comme résultat avec les précédents.

Influence de la durée de l'essai sur la résistance et l'allongement à la rupture

La durée pendant laquelle on fait un essai à la traction est très variable et dépend de la manière adoptée pour procéder aux essais et aussi du système de la machine à essayer.

Or, il est bien évident que la durée totale d'une expérience à la traction fait varier le temps pendant lequel l'éprouvette est soumise à chaque charge partielle.

On verra, d'après les expériences de Vicat, que nous citons plus loin, que des fils de fer les plus chargés présentaient des allongements sensiblement proportionnels à la durée de l'expérience, et que toute charge dépassant la limite d'élasticité, mais inférieure à la charge de rupture, produit la rupture après un certain temps d'expérience.

Les essais de M. Thurston, sur des fils de fer et sur le bois, de M. Kidder, sur le bois, permettent de tirer des conclusions semblables.

Il n'est donc pas douteux que l'on peut supposer *à priori* que la durée de l'expérience peut produire des différences sur les charges maxima de résistance et sur les allongements totaux à la rupture, et qu'il est intéressant de procéder à l'étude de ces phénomènes.

ESSAIS DE LA MARINE. — La circulaire ministérielle du 9 février 1885 reproduit les conditions de durée que nous avons indiquées précédemment.

Si nous supposons qu'il s'agisse de recevoir des tôles d'acier du type de l'Association, dont la charge de résistance maxima est de 40 kilogrammes par millimètre carré de section primitive, on voit que la charge initiale sera de 32 kilogrammes, et qu'il nous restera comme charge supplémentaire 8 kilogrammes, ou 17 opérations à effectuer.

Il faudrait donc à chacune des opérations attendre un quart de minute au moins et plus, si, au bout de ce temps, l'allongement se continuait, puis, mesurer l'allongement correspondant, et non pas se contenter de le tracer avec la pointe d'un compas sur le côté de l'éprouvette, car, sous les charges successives, les traits s'écarteraient et les renseignements qu'ils donneraient après rupture seraient absolument sans valeur.

Nous avons opéré un assez grand nombre d'essais en suivant toutes les prescriptions de la Marine, et la durée des opérations a varié de 20 à 40 minutes, suivant la nature du métal soumis aux expériences, ce qui ferait de 3 à 1,5 barrettes par heure.

En pratique, on opère beaucoup plus vite, et suivant les métaux et aussi le type de la machine, on peut compter essayer de 7 à 16 barrettes à l'heure.

On remarquera combien dans cette question il est regrettable que la pratique n'ait pas une règle plus uniforme.

EXPÉRIENCES DE M. KIRKALDY. — Les expériences de M. Kirkaldy ont été faites dans des conditions absolument spéciales :

1° Dans les conditions ordinaires de durée ;

2° A l'aide d'un déclic, il soumettait instantanément et sans choc l'éprouvette à une charge pouvant amener la rupture.

La durée de l'essai était donc réduite à 0.

M. Kirkaldy a conclu de ses essais :

1° Lorsque les essais sont opérés lentement, la section de rupture est nerveuse ; elle a, au contraire, un aspect grenu quand l'opération est faite rapidement ;

2° La résistance à la rupture par millimètre carré diminue quand la durée de l'essai est plus courte que lorsqu'elle est plus longue ;

3° La striction, au contraire, ne varie pas avec la durée de l'essai.

EXPÉRIENCES DE M. BARBA. — Cet ingénieur a opéré sur des barreaux d'acier doux de 16 millimètres de diamètre et 100 millimètres de longueur utile.

Il a opéré de trois manières distinctes :

1° Essai par traction rapide d'une durée de 2 minutes 1/2 ;

2° Essai par traction lente, sans arrêt, de la durée de 75 minutes ;

3° Essai par tractions réitérées, au nombre de dix, en laissant un intervalle de 5 minutes entre chacune d'elles, afin de laisser le barreau revenir à la température ambiante.

Voici les résultats obtenus :

MODE DE TRACTION	RÉSISTANCE	
	Charge de rupture.	Allongement 0/0.
1° Traction rapide	k 89.35	32 0/0
2° Traction lente	87.20	34 »
3° Traction réitérées	41.35	35.75

Les conclusions de M. Barba sont donc absolument contraires à celles de M. Kirkaldy.

1° La charge de rupture par millimètre carré de section augmente quand la durée de l'essai est court ;

2° L'allongement pour 100 diminue quand la durée de l'essai est court.

M. Barba croit devoir expliquer ces faits par la différence de température du métal suivant la durée des essais.

EXPÉRIENCES DE M. JOESSEL. — M. Joëssel a entrepris des essais analogues qui sont exposés dans le tableau ci-contre.

DÉSIGNATION DES PRODUITS ET MODE D'OPÉRER.	LONGUEUR des barreaux entre les congés en millimètres.	RÉSISTANCE de rupture.	ALLONGEM. en centièmes.
Barreaux de fer doux avec congés, rompus très lentement avec arrêt d'une heure à la charge de 29 k ^o , rompus entre les congés	200	33 ⁴ 35	25.81
Même fer, avec congés, rompus à la vi- tesse ordinaire de 40" à 50" par bar- reau, rompus entre les congés.	200	32.44	28.33
Même fer, avec congés, rompus très vite, avec secousses, rompus entre les congés	200	32.44	22.75

On voit que, d'après les résultats de cet expérimentateur :

- 1^o La vitesse de l'essai ne semble pas avoir d'influence bien notable sur la charge de rupture ;
- 2^o Si nous comparons les deux premiers essais, le troisième introduisant une question de chocs dont on ignore l'influence, l'allongement pour 100 augmente avec la vitesse de l'épreuve.

ESSAIS DE M. BAUSCHINGER. — Dans des essais très nombreux et très longs, M. Bauschinger a trouvé que, pratiquement, on pouvait négliger, pour les essais à la rupture du fer et de l'acier, l'influence de la durée des charges successives.

Lorsqu'on arrive à des charges voisines de la charge du maximum de résistance, il est bon, avant d'ajouter une nouvelle charge, de laisser revenir le levier de la machine d'essai à sa position normale pour être sûr de ne pas dépasser la charge nécessaire à la rupture.

On voit donc combien cette question de l'influence de la durée de l'épreuve est encore obscure, et combien il serait nécessaire que de nouvelles expériences, faites avec soin, régularité et méthode, vinssent jeter un jour nécessaire sur cette partie des essais à la traction.

**Influence de la forme de la section transversale
des barreaux d'épreuve**

EXPÉRIENCES DE LA STAATSBAHN. — M. Le Basteur a résumé, dans son ouvrage déjà cité, les expériences faites par la Staatsbahn sur des barreaux à sections cylindriques et rectangulaires de 400 millimètres de longueur.

« Le tableau suivant permet d'effectuer la comparaison.

Matières.	Numéro de duréé	Charge de rupture en kilogr. par m/m ² .			Allongements % mesuré sur 25 c/m.		
		Barreaux cylindriq. (1)	Barreaux rectangul. (2)	Différences. (2) — (1)	Barreaux cylindriq. (1)	Barreaux rectangul. (2)	Différences. (2) — (1)
Acier Martin	2	76	69	— 7	»	»	»
	3	73	78	+ 5	0.9	2.7	+ 1.8
	4	60	70	+ 10	22	17	— 5
	5	55	54	— 1	22	24	+ 2
	6	47	49	+ 2	26	28	+ 2
	7	45	40	— 5	27	31	+ 4
Acier Bessemer.	3	108	108	0	4	4	0
	4	61	61	0	20	21	+ 1
	5	64	60	— 4	17	21	+ 4
	6	56	53	— 3	15	24	+ 9
	7	51	47	— 4	24	26	+ 2
Fer à nerf		37	40	+ 3	22	29	+ 7
Fer à grain.		41	51	+ 10	28	16	— 12

« On remarquera que la longueur des deux séries de barreaux est la même, 400 millimètres, que leur section était de 720 millimètres carrés pour les barres à section rectangulaire, et 491 millimètres carrés pour les barres cylindriques; qu'enfin, le rapport de la section finale des barres laminées à celle des lingots bruts était comme 1 : 77 pour les barres rectangulaires, et 1 : 93 pour les barres cylindriques. »

M. Le Basteur conclut ainsi :

« Il y a donc présomption que la forme de la section transversale des barreaux d'épreuve n'influe pas sensiblement sur le quantum de la charge de rup-

ture par millimètre carré : tout au plus pourrait-on dire que les barreaux rectangulaires paraissent un peu plus favorables que les barreaux ronds à l'allongement des barres d'épreuve. »

Ces expériences, par suite des différences de sections et de laminage, signalées plus haut, et des écarts indiqués au tableau, ne me paraissent pas très concluantes.

EXPÉRIENCES DE M. ADAMSON. — A l'Institut du Fer et de l'Acier, tenu à Paris, M. Adamson a rendu compte d'essais très considérables qu'il a entrepris sur le fer et l'acier ; il a fait des essais sur l'influence de la forme de la section dans les essais à la traction.

Dans une même barre d'acier doux Bessemer, il a découpé 3 éprouvettes, dont une avait une section rectangulaire et les deux autres la forme ci-après ; la longueur des éprouvettes était constante : 25 millimètres ; voici les résultats obtenus :

Numéros des éprouvettes.	Surface de la section, m/m ² .	Limite d'élasticité en k ¹ par m/m ² .	Tension maxima.	Allongement à la rupture.
24	612	30	43.5	24
25	592	31	43.5	21
26	600	31	43.6	24

M. Adamson a fait d'autres essais sur des barres rondes, carrées, rectangulaires, et il conclut très nettement de ces essais que la forme de la section n'a aucune influence sur la charge maxima, mais il ne tire aucune conclusion en ce qui concerne l'allongement.

EXPÉRIENCES DE M. BARBA. — M. Barba a fait construire des barreaux d'épreuves à sections égales, mais de formes différentes. Le corroyage fut égal pour tous, et les barreaux furent recuits uniformément après le laminage.

Le tableau page 244 donne la moyenne des résultats pour chaque forme.

M. Barba fait remarquer avec raison que, dans les expériences qu'il a faites pour se rendre compte de la variation du rapport de la largeur à l'épaisseur, après la rupture, dans une éprouvette rectangulaire, on a vu que ce rapport augmentait ; l'épaisseur avait donc diminué plus qu'elle n'aurait pu le faire si la tête avait été plus épaisse, exerçant ainsi son influence en tous sens.

DÉSIGNATION des formes de section.	Limite d'élasticité. k.	Charge de rupture. k.	Striction.	Allongement total sur 100 m/m.
Rond.....	25.3	41.5	0.417	32.7
Carré.....	25.7	41.7	0.427	33.7
Rectangle....	24.6	39.6	0.435	36.0

« D'après cela, on comprend, dit M. Barba, qu'une barrette de section rectangulaire donnera, par suite de la forme habituelle des têtes, un allongement supérieur à celui des barreaux à section circulaire, puisque la tête de la première barrette n'influencera que la largeur et presque pas l'épaisseur.

« L'allongement, dans ce cas, sera donc intermédiaire entre l'allongement du barreau à section circulaire et celui du barreau idéal n'ayant pas de têtes. »

M. Barba a recherché ensuite, par des expériences directes, le meilleur rapport à donner aux dimensions transversales des éprouvettes, pour avoir, avec une épaisseur constante, l'allongement maximum.

Pour la dureté d'acier essayé, et pour l'épaisseur de 10 millimètres, il a trouvé que le rapport $\frac{\text{épaisseur}}{\text{largeur}} = \frac{1}{6}$ donnait l'allongement maximum.

« Il est à présumer, ajoute M. Barba, que ce rapport doit être constant pour des tôles d'acier de plus grande dureté et d'épaisseur quelconque.

« De nouvelles expériences plus complètes pourraient confirmer plus sûrement la valeur de ce rapport. »

TÉNACITÉ

La ténacité des métaux, en pratique, est la propriété qu'ils possèdent de résister plus ou moins facilement aux actions brusques, chocs, etc., qui tendent à les déformer d'une façon permanente ou à les rompre.

Cette qualité des métaux ne se manifeste que lorsqu'ils subissent des déformations permanentes ; elle est absolument distincte de la propriété qu'ils ont de résister aux actions lentes et continues comme les efforts de traction.

La connaissance de la charge de rupture ne peut donner aucun renseignement sur la charge de rupture aux chocs.

La ténacité résulte surtout de la quantité de carbone dissous ou incorporé dans le fer.

L'intensité des efforts et la loi qui régit ces déformations permanentes, variant avec la ténacité de l'acier, permettent justement d'en donner la mesure.

Si nous supposons qu'une pièce d'acier, de fer, etc., est soumise à un effort continu, lent et progressif, on comprend parfaitement que cet effort persistant se transmette successivement de molécule à molécule, de telle façon que toutes les molécules du corps sont sensiblement soumises à un effort semblable. Dans le cas, au contraire, où l'effort est brusque, instantané, on comprend que toutes les molécules du corps puissent ne pas avoir le temps de se répartir cet effort, et que les premières molécules touchées peuvent être désagrégées tout d'abord tandis que d'autres molécules n'auront supporté aucun effort apparent.

Les métaux peuvent donc présenter des qualités très différentes, lorsqu'ils sont soumis à des efforts lents ou à des efforts brusques.

Fragilité ou résistance aux chocs

Il est très intéressant, en pratique, de rechercher le degré de ténacité des métaux.

Cette qualité des matériaux, qui dépend surtout de leur composition chimique, est, ainsi que nous l'avons dit, absolument indépendante de leur résistance aux actions lentes et continues, comme les efforts de traction, par exemple ; et la connaissance de la charge de rupture à la traction ne peut donner aucun renseignement exact sur la fragilité ou la résistance du métal aux actions brusques.

On connaît ces tôles à chaudières en fer puddlé, qui ont été fabriquées pendant bien des années en Belgique et dans certaines localités du Nord.

Ces tôles essayées à la traction donnaient :

Charge de rupture en long . . .	32	à	35 kilogrammes
— en travers. . .	27	à	29 —
Allongements.... en long . . .	2 %	à	4 %
— en travers. . .	1/2 %	à	1 1/2 %

Au point de vue de la résistance à la traction, ces tôles présentaient donc les résistances normales des numéros 3 et 4, mais leur ductilité étaient très faible; aussi, quand on cherchait à les courber à froid ou même à chaud, elles cassaient ou présentaient des criques profondes sur toute la surface extérieure de la courbure.

Si on prend avec une pince un morceau de ces tôles, qu'on le place sur le côté

d'une enclume et qu'on frappe avec un marteau la partie qui dépasse en porte à faux, on voit le métal se briser net sous des chocs bien modérés.

Ces métaux sont connus en pratique sous le nom de métaux *aigres et secs*.

M. Thomasset, qui a exécuté un très grand nombre d'essais à la traction, a fait une observation des plus intéressantes.

« Certains fers phosphoreux, dit-il, convenablement affinés, donnent parfaitement 35 à 36 kilogrammes de résistance, avec 15 à 18 % d'allongement. Mais si l'on observe l'éprouvette, on aperçoit des criques transversales bien avant le maximum de résistance; vers 20 kilogrammes par millimètre carré, le métal est déjà tout criqué. Et cependant, à première vue, les résultats totaux feraient accepter ces fers dans bien des cas où ils deviendraient dangereux. »

Ce genre de métal serait immédiatement déclassé, au contraire, si aux essais à la traction on ajoutait des essais aux chocs; car sous une très faible hauteur de chute, il casserait net sans emboutissage.

Ces tôles employées dans la construction des chaudières ont été causes de bien terribles accidents; je rappellerai l'explosion en gare de Loos de la locomotive n° 3 372, construite à Tubize, en Belgique, les explosions de Champigneul-Mondigny, de Lignevarine, Saint-Denis, du Méré, etc.

EXPÉRIENCES DE M. LE BASTEUR. — Dans son magnifique ouvrage sur les métaux à l'Exposition de 1878, M. Le Basteur cite différents faits du plus haut intérêt sur la *fragilité* des métaux.

Cet ingénieur essaya à la traction différents fers de forge des Ardennes qui lui donnèrent une grande résistance: 48 kilogrammes, et un allongement des plus satisfaisants: 14 %.

Ce fer présentait donc une grande ténacité sous des tractions successives, et à l'opposé de ceux dont nous venons de parler, une grande ductilité, même à froid, les barres se pliant facilement au marteau sans criques apparentes. Mais si avec un burin on faisait une très légère incision sur la surface extérieure d'une éprouvette, elle se brisait net sous un coup de marteau modéré.

M. Le Basteur soumit ce métal à des essais aux chocs, à l'aide de l'appareil de la fonderie nationale de Bourges; les résultats furent très mauvais et le fer présenta une grande fragilité aux chocs.

A l'analyse chimique il contenait de 0.25 à 0.50 de phosphore.

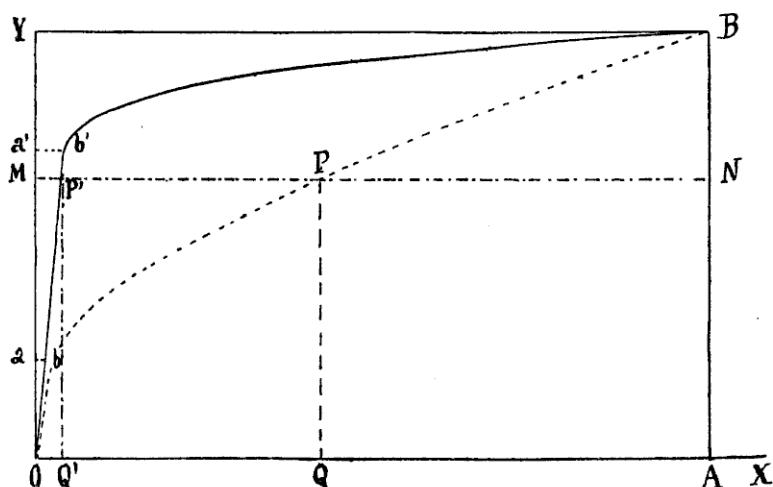
DEUXIÈMES ESSAIS DE M. LE BASTEUR. — Cet ingénieur compare deux fers puddlés.

Au point de vue de la résistance à la limite d'élasticité, on voit que ces deux métaux présentaient des différences très sensibles, tandis qu'à la rupture, au contraire, ils avaient à peu près les mêmes propriétés.

DÉSIGNATION.	Phosphore à l'analyse chimique.	Résistance par m/m ² à la limite d'élasticité.	Résistance par m/m ² à la rupture.	Allonge- ment proportionnel.
Fer des Ardennes	0.37 0/0	30 k.	40 k.	22 0/0
Fer au Bois de Reschitz (Hongrie). .	»	10 k. 70	37 k. 20	21.6 0/0

« Considérons, dit M. Le Basteur, deux barreaux identiques de l'un et de l'autre métal et traçons les courbes de résistances de ces barreaux, en portant en abscisses les allongements réels, en ordonnées les résistances brutes, et supposant les résistances à la rupture et les allongements égaux dans les deux cas.

« Nous obtiendrons des courbes ayant la forme ci-dessous :



Traits pleins OP'B, courbe relative ou fer des Ardennes.

Traits pointillés OPB, courbe relative au fer de Reschitz.

« Supposons qu'en un certain point ces barreaux présentent une paille qui réduise leur action de S à S': p étant la charge de rupture par millimètre carré commune aux deux métaux considérés, O Y = S p.; la charge de rupture totale correspondante à la section S' sera S'p = OM.

« La résistance vive de rupture opposée par le barreau en fer des Ardennes à la charge p S' sera égale à la surface O P' Q', tandis qu'à cette même charge le fer de Reschitz opposera une résistance vive de rupture de O b P Q; cette dernière résistance vive est infiniment supérieure à la première.

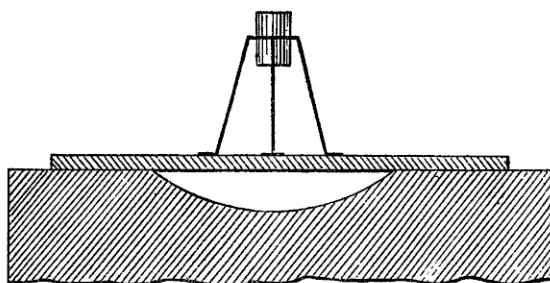
« Donc une paille qui réduirait la section résistante de S à S' provoquerait très probablement la rupture brusque du barreau en fer des Ardennes sous l'effort p S', alors que le barreau en fer de Reschitzka résisterait à cet effort en subissant une simple déformation permanente. »

On voit que certains fers et aciers ont absolument besoin d'être essayés aux chocs, les résultats donnés par les essais à la traction masquant des défauts physiques très graves.

Épreuves aux chocs par les matières explosives

Depuis quelques années on a effectué des essais aux chocs en se servant de matières explosives au lieu d'un mouton.

ESSAIS DE M. ADAMSON. — C'est au mois de juin 1876 que M. Adamson entreprit des essais comparatifs sur la résistance aux chocs des tôles de fer et d'acier.



Sur un bloc d'enclume carré de 0^m,500 de côté ayant en son milieu un creux de forme sphérique de 0^m,250 de diamètre et 0^m,10 de profondeur, M. Adamson plaçait successivement des tôles de formes carrées de 0^m,450 de côté et d'une épaisseur de 0^m,011 pour le fer et 0^m,0095 pour l'acier.

A 0^m,300 au-dessus du centre de la tôle en mettait, sur un petit trépied, une charge constante de 1 350 grammes de fulmi-coton comprimé.

Les tôles de fer étaient du fer extra (Best-Best) et l'acier Bessemer et Martin, de l'acier doux recuit.

« L'explosion du coton-poudre eut pour effet, dit M. Adamson, de briser la tôle de fer suivant un cercle correspondant au creux, et de projeter le disque détaché et plus ou moins déchiré au fond du creux de l'enclume. »

Pour l'acier, au contraire, il n'y avait pas rupture mais un simple emboutissage, correspondant au creux de l'enclume et à 0^m,075 de profondeur maximum.

Au mois de septembre 1877, M. Adamson recommença ces expériences sur

30 tôles de qualité Best-Best pour le fer provenant des meilleures forges y compris celle de Lowmoor, et des aciers doux Martin et Bessemer.

Dans ces nouveaux essais, la charge de fulmi-coton fut réduite à 680 grammes. et la distance de la matière explosive à la tôle à 0^m,225 au lieu de 0^m,300.

Les résultats des derniers essais furent exactement les mêmes que ceux de 1876, L'acier doux recuit offrit une résistance bien supérieure au fer sous les actions des chocs, s'emboutissant plus ou moins, mais ne présentant aucune rupture ni même de fente; le fer au contraire se brisait en plusieurs segments.

Les aciers non recuits présentèrent au contraire des résultats très variables.

Sur deux tôles d'acier, M. Adamson fit une expérience des plus intéressante. Une première explosion les avait déprimées par un emboutissage de 0,^m045 de profondeur. On retourna les tôles mettant la partie convexe au-dessus; par une seconde explosion, la tôle fut emboutie en sens inverse, sans présenter, après cette double action, ni fissure, ni défaut.

C'est à cet ordre d'idées que se rattachent les épreuves des tubes et des obus à l'aide de la poudre, entrepris par la Marine en 1877 à Ruelle, par Whitworth, pour comparer son acier comprimé liquide à des aciers d'autres provenances et par le Creusot.

Essais aux chocs des aciers

SERVICE DE L'ARTILLERIE DE MARINE. — Les établissements de l'Artillerie de marine ont à recevoir, pour leurs différents services: des aciers en barres — Pièces en acier. — Tôles d'acier. — Aciers profilés. — Ils ont établi 6 classes qui peuvent servir à fabriquer les barres, pièces, ferrures; mais les tôles et les profilés ne peuvent être formés qu'avec des aciers des quatre premières classes.

DÉSIGNATION.	CHUTE à effectuer au lingot		CARBONE
	à la partie supérieure.	à la partie inférieure.	
1 ^{re} classe. — Aciers extra-doux.	28 0/0	4 0/0	moins de 0.15 0/0
2 ^e classe. — Aciers doux.....	»	»	de 0.15 à 0.25 0/0
3 ^e classe. — Aciers demi-doux.	»	»	de 0.25 à 0.35 0/0
4 ^e classe. — Aciers demi-durs.	»	»	de 0.35 à 0.50 0/0
5 ^e classe. — Aciers durs	»	»	de 0.50 à 0.70 0/0
6 ^e classe. — Aciers extra-durs..	»	»	plus de 0.70 0/0

Tableau récapitulatif des épreuves
à faire subir aux aciers

NATURE DES ACIERS.	ESSAIS A LA TRACTION.										ESSAIS DE PUISE. AU CHOC.	EMPLOIS PRINCIPAUX		
	BARRETTES NON TREMPÉES.					Barrettes trempées.								
	ACIERS EN BARRES. PIÈCES EN ACIER.		TÔLES D'ACIER. ACIERS PROFILÉS.			Acier en barres. Pièces en acier.		Tôle d'acier. Aciers profilés.						
1 ^{re} des aciers.	Aciers extra doux (fer doux, etc.)	34k à 40k	29 à 26	34k à 25	35k à 22	35k à 23	20	10k à 17	> 15k	A bloc.	Pièces de forces. — Embouts. — Rivets. — Bellesse. Bandages des roues. Métaux souduits et non trempant que très légèrement. Les aciers doivent être empêcher le fer au bout et le fer supporté sans se rompre. Le corps peut être substitué par un autre. — La tête d'acier extra doux peut être substituée par une tôle au bout.	Barrettes trempées. Acier en barres. Pièces en acier. Tôle d'acier. Aciers profilés.	ESSAIS	
2 ^e	Aciers doux.	40k à 48k	25 à 22	40k à 48k	42k à 39	42k à 24	17	17 à 15k	>	Id.	Les barreaux trempés doivent être empêcher le fer au bout et le fer supporté sans se rompre. Le corps peut être substitué par une tôle au bout.	Barrettes trempées. Acier en barres. Pièces en acier. Tôle d'acier. Aciers profilés.	ESSAIS	
3 ^e	Aciers demi-doux.	46k à 54k	22 à 20	46k à 54k	48k à 20	48k à 17	18	15 à 25k	>	Id.	Pièces de forge. — Bandages de roues. Profils et tôles pour les constructions de l'artillerie, fusques, entretoises, etc.	Barrettes trempées. Acier en barres. Pièces en acier. Tôle d'acier. Aciers profilés.	ESSAIS	
4 ^e	Aciers demi-jurs.	55k à 65k	18 à 15	55k à 65k	58k à 16	58k à 13	15	12	>	Id.	Essieux de l'artillerie. Vis de pointage. Tiges de piston pour marteau pilon. Pièces de forge exigeant une grande résistance. Pièces rails, traverses, etc.	Barrettes trempées. Acier en barres. Pièces en acier. Tôle d'acier. Aciers profilés.	ESSAIS	
5 ^e	Aciers durs.	65k à 75k	12 à 8	»	»	»	»	»	»	»	Les barreaux non trempés doivent supporter sans se rompre 15 coups de mouton.	Barrettes trempées. Acier en barres. Pièces en acier. Tôle d'acier. Aciers profilés.	ESSAIS	
6 ^e	Aciers extra durs	plus de 75k	»	»	»	»	»	»	»	»	Pièces exigeant une très grande durabilité, glissières, etc. Ressorts, Marteaux.	Barrettes trempées. Acier en barres. Pièces en acier. Tôle d'acier. Aciers profilés.	ESSAIS	

Le tableau que nous donnons pages 250-251 indique les conditions auxquelles doit satisfaire le métal.

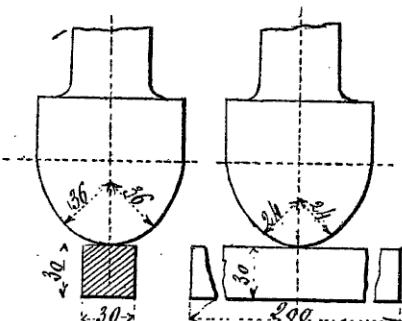
Forme de préparation des barreaux d'épreuve. — Les barreaux d'épreuve au choc auront 200 millimètres de longueur et une section carrée de 30 millimètres de côté. Ils seront tirés d'un petit lingot spécial obtenu au moment de la coulée et forgé.

Dans le cas de commandes de faible importance pour lesquelles il n'est pas fait de coulée spéciale et dont les produits sont tirés de lingots existant en magasin, les barreaux d'épreuve sont pris dans ces lingots.

Les essais seront exécutés sur des barreaux non trempés mais recuits, ou sur des barreaux trempés et recuits. La trempe et le recuit seront faits dans les mêmes conditions que les opérations correspondantes des barreaux d'essai à la traction des aciers en barres.

<i>Exécution des épreuves.</i> — La hauteur de chute du mouton pour les essais sera de	2 ^m ,750
Le poids du mouton	18 kilogrammes
Le poids de l'enclume	350 »
La distance des couteaux	160 millimètres
La saillie des couteaux	50 »

Le mouton sera en acier trempé, sa surface de frappe sera conforme au croquis ci-dessous.



On mesure après l'épreuve, et à titre de renseignement, la flèche de la partie du barreau comprise entre les couteaux.

Nombre et interprétation des essais. — Pour les aciers des quatre premières classes, il est fait par coulée (ou par commande, dans le cas d'une commande ne donnant pas lieu à une coulée spéciale), un essai au choc sur un barreau trempé.

Pour les aciers de la 5^e classe, l'épreuve est faite sur un barreau non trempé.
Il n'est pas fait d'épreuve pour les aciers de la 6^e classe.

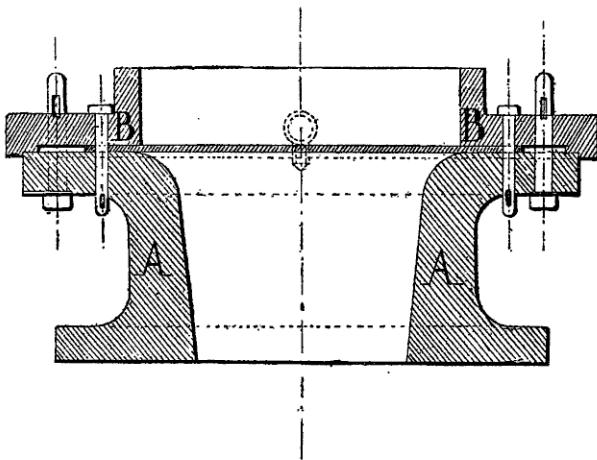
Le barreau doit supporter sans se rompre 15 coups de mouton.

Si le barreau essayé donne de bons résultats, la coulée est acceptée.

S'il ne remplit pas les conditions imposées, il est fait sur deux barreaux des contre-essais qui devront donner tous deux des résultats satisfaisants, sinon la coulée sera rebutée.

ESSAIS AU CHOC PAR LE COMPTOIR DES FORGES SUÉDOISES. — Le rapport des essais entrepris par MM. F. Didron, E. Westman et C.-A. Augstrom, pour le Comptoir des Forges Suédoises, nous offre le compte rendu d'expériences au choc des plus intéressantes sur des tôles d'acier et de fer de différentes provenances Suédoises, Anglaises, Creusot, Terre-noire, Fr. Krupp à Essen et Borsig à Berlin.

Ces expérimentateurs, croyant d'après leur expérience que les essais au choc se font mieux sur des tôles rondes que carrées, firent préparer des disques de 1 mètre de diamètre et de 9 millimètres d'épaisseur.



L'appareil d'essai se composait, comme l'indique la figure, d'un bloc de fonte creux A A conique à l'intérieur et portant à la partie supérieure un arrondi suffisant pour que les tôles en se cintrant ne soient pas soumises à un angle vif qui pouvait amener des ruptures brusques.

Le centre de la tôle correspondait au centre de ce cône ; un cadre en fonte B B reposait sur la tôle. L'assemblage des deux pièces A A, B B était obtenu à l'aide de boulons à clavettes, 6 de 37 millimètres de diamètre et 36 de 28 millimètres, tous placés sur deux circonférences et en quinconce ; l'ensemble de cet appareil pesait 2 570 kilogrammes et reposait sur une tôle de 47 millimètres d'épaisseur qui terminait une fondation de déchets de fonte et de copeaux de tour.

Le mouton cylindrique à deux guides pesait 872 kilogrammes, et son extrémité se terminait par une demi-sphère de 253 millimètres de diamètre.

La hauteur de chute maxima était de 9 mètres.

Dans des essais préliminaires on se rendit compte de l'impossibilité d'adopter une hauteur de chute constante pour tous les métaux ; des tôles de fer puddlées se cassaient au premier coup sous une chute de 1 mètre, tandis que les tôles d'acier résistaient à 25 coups de mouton à 1^m,50 de hauteur, 6 à 7 coups à 4^m,50, 3 à 9 mètres. Les expérimentateurs désirant mesurer surtout la déformation produite sous l'action du choc, décidèrent de prendre les hauteurs de chute de :

4^m,50 pour les tôles d'acier
1^m,50 » » de fer

Ils mesuraient la dépression après chaque coup de mouton et arrêtaient les essais dès que les tôles présentaient des indices de cassure.

Les conclusions de ces essais sont des plus intéressantes :

1° Le Comité ne croit pas que le nombre de coups de mouton puisse indiquer toujours avec certitude la qualité de la tôle.

2° La profondeur de la dépression, relevée avant le coup de mouton produisant la rupture, donne, au contraire, une indication plus exacte de la valeur du métal.

3° Il est impossible de juger de la qualité de la tôle suivant la manière dont elle s'est rompue.

4° Les tôles d'acier ont montré toujours une bien plus grande résistance au choc que les tôles de fer.

5° Les tôles qui présentaient la plus grande dépression au choc montraient aussi la plus grande ductilité dans les essais à la traction.

6° La résistance au choc diminue, en général, avec la quantité de carbone contenu dans les aciers ; mais le corps qui a l'influence la plus néfaste sur la ductilité d'un métal au choc, c'est le phosphore, et, comme il agit beaucoup moins sur les résultats de l'allongement % à la rupture dans les essais de traction, on voit que le phosphore empêche de conclure, étant donné l'allongement de rupture, la résistance d'un métal au choc.

Ce fait a surtout été très remarquablement mis en évidence dans des essais sur les tôles de fer de Lowmoor et de Bowling ; ces deux tôles donnaient le même allongement de rupture à la traction : 9.5 %, mais elles contenaient 0,0921 et 0.125 de phosphore ; la première présenta une dépression de 68 millimètres sous trois coups de mouton de 1^m50, la seconde cassa net au premier coup.

7° Le recuit des tôles d'acier augmente très sensiblement la résistance au choc.

8° La trempe, au contraire diminue la résistance au choc.

Voici un tableau qui résume les chiffres les plus intéressants de ces essais :

Tôles Bessemer Suédoises.

	Nombre de coups de mouton à 4°50.	Dépression finale moyenne	Allongement pour 0/0 à la rupture de traction sur 200 m/m
Carbone 0.10 0/0 et au-dessous	6	159	30
» 0.10 0/0 à 0.15 0/0.....	6	157	27.5
» 0.15 0/0 à 0.20 0/0..	6.2	153	27.5
» 0.20 0/0 à 0.25 0/0.....	6.2	150	25.8
» 0.25 0/0 à 0.30 0/0.....	6.3	144	22 »

Tôles Martin Suédoises.

Carbone 0.10 0/0 et au-dessous.....	7	174	35.4
» 0.10 0/0 à 0.15 0/0.....	6	165	38.3
» 0.15 0/0 à 0.20 0/0	6.5	168.5	30
» 0.20 0/0 à 0.25 0/0	7	166	28.7

EXPÉRIENCES DU GÉNÉRAL UCHATIUS. — Le général Uchatius a entrepris de essais au choc les plus intéressants sur la résistance à la rupture de la fonte à la traction par choc.

Ces expériences, faites avec un expert scientifique tout spécial, lui permit de comparer des métaux entre eux d'après le nombre de coups nécessaires pour rompre des barreaux de mêmes dimensions, la hauteur de chute restant constante.

Observations sur les essais aux chocs

Dans les essais aux chocs, il y a, pour comparer les résultats obtenus avec différentes machines, à étudier un point capital, c'est celui du travail perdu dans les conditions de l'expérience.

Pour ces essais on laisse tomber un poids d'une hauteur donnée sur la pièce soumise à l'épreuve.

Cette pièce repose sur deux points d'appui qui font partie d'une enclume dont

la masse, le poids, la charpente ou la maçonnerie qui la réunit au sol sont variables suivant les machines.

L'élasticité de tout cet ensemble de l'enclume, les vibrations de la pièce, la résistance de l'air vont absorber une partie plus ou moins considérable du travail dû à la chute du mouton, et cette partie du travail ne sera nullement employée à la déformation de la pièce.

Le rapport du travail perdu au travail total de chute est très variable ; avec certaines installations, il atteint 0,50 à 0,60 avec d'autres 0,15 ou 0,20 seulement.

On voit donc combien il est nécessaire, pour que les essais aux chocs soient comparables, de s'entendre sur la question d'établissement des détails de l'appareil d'essai.

Dans les essais aux chocs doit-on adopter la méthode d'Adamson ou celle de Jercontor et de l'artillerie de marine, c'est-à-dire la méthode des explosifs ou celle du mouton ?

Je ne voudrais pas décider une question encore fort obscure, mais je ferai remarquer que dans la méthode Adamson on a un avantage considérable, c'est qu'elle ne donne qu'un seul fort coup qui permet, par la dépression produite, de mesurer la qualité de la tôle.

Mais, d'un autre côté, à moins de faire des essais préalables pour faire varier la charge de fulmi-coton suivant la qualité de la tôle, dans bien des cas, dans les essais de tôle de fer surtout, la tôle, au lieu de s'emboutir, se fracturera et on ne pourra se servir de la mesure de l'emboutissage pour comparer les tôles.

Le coton-poudre employé par Adamson était mouillé et bien comprimé ; il est bien évident qu'il est nécessaire aussi d'être sûr de la grande régularité de ce produit.

Dans les essais au mouton, un des inconvénients les plus graves c'est que, si bien guidé que soit le mouton, on n'est pas absolument sûr qu'à chaque coup, il tombera juste au même point sur la tôle et, par suite, les efforts exercés peuvent ne pas être uniformes et la tôle casser bien avant le moment où elle se serait rompue si le coup de mouton avait été frappé toujours au centre.

ESSAIS SUR LA DURETÉ DES MÉTAUX

On sait que la dureté est la propriété qu'ont les corps solides de résister aux efforts qui tendent à entamer leur substance.

Dans la mécanique, on doit limer, percer, raboter, tourner, fraiser, etc., à froid

les métaux, et toutes ces opérations sont plus ou moins faciles ou difficiles suivant la nature plus ou moins dure du métal.

La dureté ne se présente donc que lorsque le métal est soumis à des efforts produisant une *déformation permanente*.

Les recherches chimiques ont démontré que, pour le fer et l'acier, la dureté dépendait surtout de la proportion de carbone dissous ou incorporé à l'état de mélange.

De nombreuses expériences dues à MM. Kirkaldy, Kunt Styffe, le colonel Rosset, Bauschinger, ont démontré que, pour des aciers de différentes duretés, la durée de la période d'élasticité parfaite seule est variable, que le coefficient d'élasticité reste sensiblement le même, et que l'on peut mesurer la dureté de l'acier, en étudiant l'intensité et la loi d'accroissement des déformations permanentes sous l'influence des efforts exercés.

ESSAIS DU COLONEL ROSSET. — Le colonel Rosset a recherché le volume des entailles produites dans les différents métaux par un couteau de forme spéciale, sous un effort constant et déterminé.

Il a admis que la dureté des métaux est en raison inverse des volumes de l'entaille, et a pris pour base, c'est-à-dire pour 0, de la dureté l'entaille faite sous une charge de 3 850 kilogrammes sur du cuivre laminé, et représenté par 10, l'acier trempé le plus dur comme ne montrant aucune entaille sous l'action du couteau.

Les métaux se trouvent intercalés entre ces deux nombres suivant leur dureté.

ESSAIS DE M. SMITH. — De très nombreux essais ont été faits par cet ingénieur sur des rails en acier Bessemer de Barrow, et il a pensé que l'on pouvait très bien mesurer la dureté de l'acier, en considérant l'effort nécessaire pour poinçonner les trous d'éclisses.

On sait, en effet, d'après les expériences de M. Barba, que le poinçon ne produit qu'une altération toute locale dans une zone circulaire de $1\text{m}/\text{m} \times 1\text{m}/\text{m} \cdot 5$; on peut donc, au lieu de percer tout le trou au foret, le poinçonner à 2 mil., 5 plus petit et l'amener à grandeur rigoureuse par la machine à percer.

Voici un tableau extrait de ces expériences :

Expériences sur les rails Bessemer de l'usine Barrow.

TENEUR EN CARBONE.	Effort néces- saire pour poin- çonner un trou de 22 m/m 225 de diamètre épaisseur 19 m/m.	Résistance au cisaillement par m/m ²	Effort de flexion donnant une flèche perman. $l = 0.914$	ESSAIS A LA TRACTION	
				charge de rupture par m/m ² .	Allongement % sur 50 m/m 8 de longueur.
RAILS DOUX	Kil.	Kil.	Ton.	Kil.	pour 100
	0.28	47.380	35.6	19.235	36.25
	0.29	49.670	37.4	20.554	34. 5
	0.30	50.110	37.7	20.808	34. 9
RAILS DURS	0.32	51.750	38.9	20.978	32. 0
	0.36	57.640	43.4	23.845	26. 0
	0.40	59.180	44.5	23.845	24. 5
	0.45	66.170	50.1	26.390	16. 5
	0.50	75.620	56.9	28.420	3. 0
	0.57	83.700	63.0	31.465	3. 0

On remarquera que l'effort nécessaire pour poinçonner le trou d'éclisse, la résistance au cisaillement, l'effort de flexion, la charge de rupture varient dans le même sens que la teneur en carbone, c'est-à-dire avec la densité, sans pourtant que les rapports des augmentations successives soient exactement les mêmes.

ÉLASTICITÉ

En France, les Ingénieurs et les Constructeurs se préoccupent toujours, avec juste raison, dans leurs projets, d'une propriété spéciale à différents corps et surtout aux métaux, connus sous le nom d'*élasticité*.

Je ne puis traiter ici la question si importante et si complexe de l'élasticité, mais il me paraît indispensable d'indiquer où en sont nos connaissances sur un point si discuté de la mécanique moléculaire.

Les idées anciennement acceptées sur l'élasticité des corps étaient les suivantes :

Supposons une barre de fer AB placée verticalement et fixée d'une façon invariable à l'une de ses extrémités A. À l'autre extrémité, appliquons une petite force extérieure agissant dans la direction de l'axe de la tige, la tige s'allongera en diminuant légèrement de section, le point B venant en B'.

Si on venait à enlever cette force qui, par hypothèse, n'avait pas été trop grande par rapport à la section de la tige et à la nature du métal soumis à l'expérience, on admettait que la tige reprenait sa première position, le point B' remontait en B.

On disait dans ce cas que la *limite d'élasticité* n'avait pas été dépassée.

Si au contraire, la force avait été trop grande, après son enlèvement, la tige ne reprenait pas sa position primitive, le point B' ne remontait qu'en B''; on disait alors que la *limite d'élasticité* avait été dépassée. Le solide avait subi une déformation permanente qui était indiquée par l'allongement permanent BB''.

L'élasticité était donc considérée comme une propriété des corps, en vertu de laquelle ils reprenaient leur forme primitive lorsque les forces, contenues dans une certaine limite, qui les avaient déformés, cessaient d'agir.

Si la tige en expérience soumise à une force extérieure ne revient pas à sa forme première, on appelle *allongement total* la longueur BB' dont la barre s'est allongée sous l'influence de la force.

La force supprimée, l'allongement diminue, mais la tige ne reprend pas sa première longueur, on appelle *allongement permanent* la portion BB'' de l'allongement total qui subsiste après la disparition de la force, et *allongement élastique*, la portion de l'allongement total qui disparaît avec la force, c'est-à-dire B'B''.

L'expérience a démontré que cet allongement élastique est, pour le fer et l'acier, proportionnel à l'effort, ce qui fait qu'on l'a souvent appelé *allongement proportionnel* et qu'il a une valeur spéciale pour chaque métal.

Charge limite d'élasticité

Si, pour fixer les idées, nous admettons que la tige que nous essayons est en fer, et que nous fassions l'expérience avec graduation, c'est-à-dire en enlevant et remettant des poids successifs, nous constaterons que, jusqu'à la charge de 15 kilogrammes environ par millimètre carré, nous n'observons aucun allongement permanent, du moins avec les moyens d'observations que l'on possédait il y a quelques années; lorsque nous retirons la charge, l'*allongement total* est donc dans ce cas purement un *allongement élastique*.

Mais, à partir de cette charge de 15 kilogrammes par millimètre carré, on voit les allongements permanents se produire et prendre de plus en plus d'importance par rapport aux allongements élastiques.

On admettait alors que la force sous laquelle ces allongements permanents se produisaient d'une manière sensible, représentait justement la *charge à la limite d'élasticité* du métal.

On supposait donc qu'avant cette charge la matière ne présentait pas d'allongements permanents, et, que de plus, ce chiffre de charge était constant pour le même métal.

Or, comme nous allons le voir, ces deux hypothèses sont fort douteuses.

On n'a pas toujours été d'accord sur la définition de cette limite d'élasticité.

Pratiquement on appelait donc charge à la *limite de l'élasticité* ou, par abréviation, *limite d'élasticité*, la charge sous laquelle les allongements permanents se produisent d'une manière sensible.

Idées nouvelles sur l'élasticité

Il est évident qu'une pareille définition n'a rien de précis et de scientifique, et que cette limite cherchée dépendra de la valeur des expérimentateurs et des appareils de précision employés. Ainsi avec des éprouvettes de 100 millimètres de longueur entre repères et un vernier donnant le $(\frac{1}{20})^{\text{e}}$ de millimètre, on trouvera facilement le premier allongement permanent quand il sera de 0 mil., 05 sur l'éprouvette, mais, M. Tresca, avec des cathétomètres est arrivé dans ses magnifiques expériences sur l'élasticité, avec des barres d'épreuves de 2^m,500 de longueur, à observer le premier allongement permanent lorsqu'il était de 0 millimètre, 0005. Depuis les beaux travaux, mais déjà anciens, de M. Wertheim, des travaux plus récents, et surtout les magnifiques recherches de M. Bauschinger et de Tresca, ont prouvé, grâce à des appareils qui permettent une approximation de 2 dix-millièmes de millimètres, que même, sous des charges bien inférieures à celles de la limite d'élasticité, il y a déjà des allongements permanents.

TRAVAUX DE M. WERTHEIM.—M. Wertheim a exposé, en effet, dans un travail publié en 1848, que pour lui *il n'existe pas de vraie limite d'élasticité*. Il prétendait déjà à cette époque, que toute charge produit un allongement permanent, qui n'est appréciable que si on a eu soin de prendre une longueur de tige en proportion avec le degré de précision de l'appareil employé pour les lectures, et de laisser la charge agir pendant un temps suffisamment prolongé.

Les expériences de M. Bauschinger ont absolument vérifié les travaux de M. Wertheim.

TRAVAUX DE M. EATON HODGKINSON. — Ce savant physicien anglais a fait des expériences les plus intéressantes sur la résistance du fer.

Il a pris une barre de fer forgé de 15 mètres de long et d'un diamètre de 0^m,01313, et l'a soumise à des charges variant de 5 à 100 livres.

Le tableau ci-dessous donne le résumé de ses expériences.

CHARGE PAR M/M ² DE SECTION		ALLONGEMENT PAR MÈTRE DE LONGUEUR			RAPPORT DE LA CHARGE A L'ALLONG.	
en livres.	en kilogr.	total.	permanent.	élastique.	total.	élastique.
5	1.87	0.082	»	0.082	22.0	222.
10	3.75	0.185	»	0.185	20.2	820.
15	5.62	0.284	0.003	0.281	19.8	20.0
20	7.60	0.380	0.003	0.377	19.7	19.9
25	9.37	0.485	0.004	0.471	19.7	19.9
30	11.25	0.571	0.005	0.566	19.7	19.9
35	13.12	0.666	0.007	0.659	19.7	19.9
40	15.00	0.760	0.010	0.750	19.7	20.0
45	16.87	0.873	0.033	0.840	19.3	20.1
50	17.75	1.013	0.083	0.980	18.5	20.2
55	20.64	1.283	0.262	1.021	16.1	20.2
60	22.50	2.360	1.130	»	9.5	»
65	24.36	4.287	3.071	1.216	5.7	20.0
70	26.25	9.951	8.574	1.377	2.6	19.1
75	28.12	10.493	9.102	1.391	2.6	20.0
80	30.00	17.878	16.515	1.373	1.7	21.8
85	31.87	21.486	19.795	1.691	1.5	18.9
90	33.75	24.774	22.709	2.065	1.8	16.3
95	35.62	31.935	32.820	2.115	1.0	17.0
100	37.46	rupture.	»	»	»	»

On remarquera :

1° Que l'allongement permanent, avec les moyens d'observation qu'avait Hodgkinson, semble nul jusqu'à la charge de 5 kilogrammes par millimètre carré de section.

2° Jusqu'à 15 kilogrammes, l'allongement total est à peu près proportionnel à la charge.

3° C'est entre 20 et 22 kilogrammes, que l'allongement permanent prend des valeurs rapidement croissantes.

4° Jusqu'à 30 kilogrammes de charge par millimètre carré, le rapport de la charge à l'allongement élastique par unité de longueur reste constant.¹

5° A partir de la charge de 20 kilogrammes par millimètre carré de section, les allongements permanents augmentent beaucoup plus rapidement pour une même charge, que les allongements élastiques, et la constance du rapport des charges par unité de surface à l'allongement par unité de longueur n'existe plus.

M. Hodgkinson propose alors de considérer la limite d'élasticité comme dépassée.

Ce qui revient à donner pour définition de la charge limite de l'élasticité, la suivante:

On appelle charge à la limite d'élasticité, la charge pour laquelle le rapport de la charge par unité de surface à l'allongement par unité de longueur n'est plus constant.

6° On remarquera que l'allongement élastique va en croissant depuis la charge initiale jusqu'à la charge de rupture, mais que les accroissements successifs diminuent au fur et à mesure que la charge augmente.

7° M. Hodgkinson propose de prendre comme valeur du coefficient d'élasticité E, la moyenne des 16 rapports inscrits dans la dernière colonne de son tableau, c'est-à-dire la moyenne du rapport de la charge rapportée à l'unité de surface à l'allongement par mètre, pour toutes les charges auxquelles ont été soumis le métal entre O et la charge limite de l'élasticité, soit dans le cas présent 20.

OPINION DE M. VICTOR DESHAYES. — M. Victor Deshayes, Ingénieur des Aciéries de Terre-noire, dans son travail sur les rapports existant entre les compositions chimiques et les propriétés mécaniques des aciers, publié en 1879, définit ainsi la limite d'élasticité :

« Il arrive un moment où les déformations permanentes, d'abord très petites et à peine mesurables, deviennent brusquement considérables. Au même moment les allongements (totaux), qui étaient, pendant la première période de l'expérience, proportionnels aux charges, croissent plus vite que les charges... Cette première période a pour limite supérieure la limite d'élasticité, et à cette limite correspond une déformation, qui est ce qu'on doit appeler l'allongement élastique maximum ; le quotient de l'une par l'autre donne le module d'élasticité moyen à la limite d'élasticité. »

OPINION DE M. CONSIDÈRE. — M. Considère, dans son travail, propose une autre définition, il prend « pour limite d'élasticité, la tension pour laquelle l'allongement total est le double de l'allongement élastique calculé. »

Dans les expériences de Hodgkinson, que nous avons citées, cette limite serait alors vers 22 kilogrammes.

TRAVAUX DE M. BAUSCHINGER. — M. Bauschinger accepte pour définition de la limite de l'élasticité, la charge limite qui donne la proportionnalité des charges aux allongements totaux.

Cet expérimentateur a été amené, dans son étude sur les aciers doux tout particulièrement, à examiner un point particulier de la courbe des déformations. Il

a remarqué, qu'au-delà de la limite d'élasticité, les allongements croissent assez lentement pendant un certain temps, le temps pendant lequel la charge reste sur la tige n'a pas d'action sur l'allongement, qui ne diminue pas non plus si on enlève la charge, observation qui est contradictoire avec celles d'autres expérimentateurs.

Cette seconde limite, M. E. Mayer, Ingénieur des Ponts et Chaussées, dans son intéressant compte-rendu des expériences de M. Bauschinger, l'appelle « *Lmite de grande extension* » ou « *Limite de grande compression* ». A partir de cette limite, les allongements totaux et permanents croissent très rapidement, ils augmentent avec le temps que la charge reste en action, et les allongements décroissent pendant très longtemps après l'enlèvement.

M. Mayer classe les propositions émises par M. Bauschinger en quatre chapitres.

I. — VARIATIONS DE L'ÉLASTICITÉ SOUS L'ACTION D'UNE CHARGE QUI DÉPASSE LES LIMITES PRIMITIVES DE L'ÉLASTICITÉ.

1^o Lorsqu'on soumet une pièce à un effort qui dépasse la limite d'élasticité, mais qui est inférieur à la limite de grande extension, on produit une élévation de la limite d'élasticité. Cette élévation est d'autant plus grande que la charge est plus forte, et on peut la constater immédiatement après l'enlèvement de la charge. Lorsque la charge s'approche de la limite de grande extension, la limite d'élasticité atteint un maximum. Si la charge dépasse la limite de grande extension, la limite d'élasticité subit un abaissement qui, ainsi qu'on le verra plus loin, est momentané.

2^o Lorsqu'on soumet une pièce à des efforts qui dépassent la limite de grande extension, celle-ci s'élève jusqu'à la valeur maximum de l'effort auquel la pièce a été soumise. On constate ce résultat immédiatement après l'enlèvement de la charge. Mais si, après cet enlèvement, on laisse la pièce en repos, l'élévation de la limite de grande extension dépasse l'effort maximum auquel la pièce a été soumise et se continue, en augmentant toujours, pendant des semaines, des mois et peut-être des années.

3^o Dans les mêmes conditions qu'à l'article précédent, c'est-à-dire quand une pièce a été soumise à des efforts qui dépassent la limite de grande extension, la limite d'élasticité, mesurée immédiatement après l'enlèvement de la charge, se trouve abaissée et souvent réduite à zéro. Mais si la pièce est laissée en repos, la limite d'élasticité se relève, dépasse la valeur primitive, atteint au bout de plusieurs jours la valeur de l'effort auquel la pièce a été soumise et finit même, au bout d'un temps suffisant (à coup sûr au bout de plusieurs années), par dépasser cette valeur.

4° Le module d'élasticité (rapport des charges aux allongements) augmente généralement en même temps que la limite d'élasticité ; ce coefficient s'élève pendant la période de repos. Après plusieurs années, on l'a trouvé, sauf quelques exceptions, plus grand que dans l'état primitif.

II. — VARIATIONS DE LA LIMITÉ D'ÉLASTICITÉ PAR LE MARTELAGE, LE RECUIT ET LA TREMPE.

De violentes secousses, comme en produit le forgeage à froid et les manutentions subséquentes, rabaissent un peu la limite de grande extension, mais elle reste encore bien supérieure à sa valeur primitive. Quant à la limite d'élasticité, elle retombe à sa valeur primitive, s'il n'y a pas extension de la pièce par le forgeage ; s'il y a extension, elle reste plus haut.

Voici maintenant les propositions relatives à l'action de hautes températures suivies d'un refroidissement lent ou brusque.

L'action de l'échauffement et du refroidissement subséquent n'a d'influence, sur l'élasticité du fer fondu qu'à partir de 350° avec refroidissement brusque, et 450° avec refroidissement lent. Au-dessous de ces chiffres, l'échauffement suivi de refroidissement, même si on répète jusqu'à dix fois l'opération, est sans influence sur ces limites. Avec le fer soudé c'est à 400° que commence l'action quel que soit le mode de refroidissement.

Au-delà des limites que nous venons d'indiquer, l'action de l'échauffement suivi de refroidissement, lent ou rapide, est toujours dans le sens d'une diminution des deux limites, d'autant plus grande que l'échauffement a été plus fort, mais beaucoup plus marquée pour la limite d'élasticité que pour la limite de grande extension.

Le refroidissement brusque, après échauffement, affecte les deux limites, et surtout la limite d'élasticité beaucoup plus énergiquement que le refroidissement lent. Avec le refroidissement brusque, il suffira le plus souvent de 500°, et à coup sûr du rouge cerise, pour faire tomber la limite d'élasticité jusqu'à zéro ou jusqu'aux environs de zéro, aussi bien avec le fer fondu ou soudé qu'avec l'acier Bessemer, tandis que, dans le cas du refroidissement lent, on n'arrive jamais à un pareil abaissement de la limite d'élasticité, même après que l'échauffement a atteint le rouge cerise.

III. — VARIATION DE L'ÉLASTICITÉ SOUS L'ACTION D'UN PETIT NOMBRE DE CHARGES SUCCESSIVES ALTERNATIVEMENT DE SENS CONTRAIRE.

Lorsqu'on soumet une pièce à un effort de traction supérieur à la limite d'élasticité, la limite d'élasticité à la compression se trouve notablement abaissée. Il suffit que la limite d'élasticité ait été dépassée à la traction, de quantités rela-

tivement faibles, pour que la limite d'élasticité à la compression se trouve abaissée jusqu'à zéro. On peut relever cette limite d'élasticité par l'action de la compression. Si ensuite on soumet la pièce à une compression qui dépasse cette limite d'élasticité, on trouve que la limite d'élasticité à la traction est abaissée jusqu'à zéro ou aux environs. Le temps a peu ou pas d'influence sur ces phénomènes, c'est-à-dire qu'une limite d'élasticité, abaissée par les actions précédemment décrites, ne se relève pas sensiblement au bout de plusieurs semaines.

Lorsqu'on soumet une pièce à des efforts croissants et alternativement de sens contraire, la limite d'élasticité dans un sens ne se trouve abaissée que lorsqu'on a préalablement dépassé la limite d'élasticité primitive dans le sens opposé.

Lorsque la limite d'élasticité dans un sens a été abaissée par un effort appliquée dans l'autre, et supérieur à la limite d'élasticité primitive, on peut relever la limite d'élasticité abaissée au moyen d'efforts croissants et alternativement de sens contraire. Mais on n'obtient ainsi qu'une nouvelle limite d'élasticité, notamment inférieure à la limite primitive.

IV. — VARIATION DE L'ÉLASTICITÉ ET DE LA STRUCTURE, ET CONDITIONS DE RUPTURE SOUS L'ACTION D'EFFORTS SUCCESSIFS RÉPÉTÉS UN TRÈS GRAND NOMBRE DE FOIS.

Lorsqu'on soumet une pièce à la répétition d'efforts, alternant entre une limite inférieure nulle et une limite supérieure voisine de la limite d'élasticité primitive, la rupture n'a pas lieu, même après un nombre d'efforts de 5 à 16 millions.

Quand on soumet une pièce à des efforts alternant entre zéro et une limite voisine de la limite d'élasticité primitive, ou dépassant plus ou moins cette limite, la limite d'élasticité s'élève et dépasse (et souvent de beaucoup) l'effort maximum subi par la pièce. Cet accroissement de la limite d'élasticité se continue à mesure que le nombre des efforts devient plus grand, sans pouvoir cependant dépasser une certaine limite.

La répétition des efforts, alternant entre zéro et une valeur supérieure φ , n'amène pas la rupture, si la limite d'élasticité peut être élevée par cette répétition jusqu'à une valeur plus grande que φ ; si, au contraire, φ est trop grand pour que la limite d'élasticité puisse dépasser cette valeur, la rupture se produira au bout d'un certain nombre d'efforts.

Lorsqu'une pièce a été soumise à des efforts plusieurs millions de fois répétés, la résistance à la rupture sous une charge statique n'en est pas diminuée, elle serait plutôt augmentée.

Conclusion. — On voit, d'après ce rapide exposé de quelques-uns des travaux importants, que l'on n'est pas d'accord sur la définition même de la *limite d'élasticité*, et que beaucoup d'expérimentateurs n'admettent pas les hypothèses qui ont été généralement acceptées jusqu'à ces dernières années.

Recherche du coefficient d'élasticité

On comprend tout l'intérêt qu'il y a, en construction, à connaître le coefficient d'élasticité des principaux métaux, et nous avons vu comment MM. Hodgkinson, Bauschinger, etc..., ont déterminé, par des essais directs, cette donnée importante. Je crois devoir citer ici deux méthodes scientifiques des plus intéressantes dues à des savants éminents.

La première est celle de M. Phillips, membre de l'Institut, basée sur la théorie du spiral, et dont il doit entretenir le Congrès; la seconde est due à M. Mercadier, Directeur des études à l'École Polytechnique et repose sur la théorie des vibrations des plaques de Kinchoff.

Il me paraît impossible de terminer ces quelques observations sur l'élasticité, sans citer les séries d'expériences qui viennent ouvrir des horizons tout nouveaux sur le mode de travail des métaux, dans les conditions de la pratique.

Expériences sur le mode de travail des métaux soumis d'une façon continue à des charges constantes supérieures à la charge limite de l'élasticité, mais inférieures à la charge de rupture.

EXPÉRIENCES DE VICAT. — En 1834, M. Vicat publiait, dans les Annales des Ponts et Chaussées, les résultats d'une série d'expériences qu'il avait entreprises sur quatre échantillons de fils de fer recuit et non recuit, en les chargeant d'un poids égal au $1/4$, $1/3$, $1/2$, $3/4$ de la charge qui avait produit la rupture du même fil.

De ces expériences on pourrait déduire les conséquences suivantes :

1° Des charges inférieures à la limite d'élasticité produisent des allongements permanents, et, par suite, la définition de la charge limite d'élasticité, telle qu'elle était admise, était déjà reconnue fausse en 1834.

2° Des charges bien inférieures à la charge de rupture produisent des allongements permanents qui vont toujours en croissant, et pourraient probablement à la longue amener des accidents graves.

EXPÉRIENCES DE M. THURSTON. — Cet habile expérimentateur américain a fait des expériences sur le temps nécessaire pour rompre des fils de fer, lorsqu'ils sont soumis à des efforts permanents égaux à une fraction de la charge de rupture constatée par un essai ordinaire.

La fraction a varié de $\frac{95}{100}$ à $\frac{55}{100}$

Ces essais semblent prouver que, pour des charges supérieures à la limite d'élasticité, mais, très inférieures à la charge de rupture, le métal non seulement subit une déformation permanente, mais peut arriver à se rompre sous l'action persistante de cette force.

Expériences sur le mode de travail du métal soumis à des efforts répétés dans la même sens ou en sens inverse un grand nombre de fois sous forme de tractions, flexions ou torsions.

Je termine en rappelant les magnifiques expériences de M. Wohler sur le travail des métaux. Ces recherches ont servi de base à des théories et formules nouvelles absolument contraires, du moins en apparence, à nos idées françaises sur l'élasticité.

Je transcris ci-dessous le résumé des essais de Wohler d'après M. Seyrig.

EXPÉRIENCES DE M. WOHLER.

I. — Lorsqu'une pièce subit un certain nombre de fois des efforts provenant d'une charge alternativement appliquée et enlevée, ou bien diminuée seulement, la rupture se produit sous une moindre fatigue par unité de section, que lorsque la charge est appliquée doucement.

II. — Le nombre de répétitions de l'effort nécessaire à la rupture est d'autant plus grand que le coefficient de travail maximum est plus faible, le travail minimum restant le même.

III. — Le nombre de répétitions de l'effort nécessaire à la rupture est d'autant plus grand que le coefficient de travail minimum est plus grand, le travail maximum restant d'ailleurs le même.

IV. — Quand le travail maximum reste au-dessous d'une certaine limite, il n'y a jamais rupture, quel que soit le nombre de répétitions.

V. — Cette limite de non-rupture α est d'autant plus élevée que le travail minimum est plus grand.

Les expériences de Wohler introduisent donc dans le travail des métaux une question des plus importantes, celle de la répétition de l'effort et du sens dans lequel il agit.

ESSAIS A LA COMPRESSION, A LA FLEXION, A LA TORSION

Si nous passions en revue les différents essais faits à ce sujet, nous aurions à formuler des observations absolument semblables, ou au moins analogues, à celles que nous avons été obligés de faire pour les essais à la traction.

Je crois donc inutile d'allonger ce travail.

CONCLUSIONS ET VŒU.

Nécessité d'introduire une certaine uniformité dans les méthodes d'essais des matériaux employés dans la mécanique, et de choisir des unités communes pour exprimer les différents résultats obtenus dans les essais sur les métaux.

Les grands travaux publics entrepris par les ingénieurs depuis 50 ans ont donné un nouvel essor à l'étude de la résistance des matériaux.

Cette étude est, en effet, la seule voie rationnelle qui permette à l'ingénieur de marcher vers le progrès, de faire un choix dans les divers matériaux mis à sa disposition par la nature et l'industrie, d'étudier leurs propriétés avant d'établir ses projets, et de surveiller la réception des fournitures pour maintenir les conditions des cahiers des charges.

A mesure que les travaux atteignent des dimensions de plus en plus considérables, il est bien évident que les matériaux doivent satisfaire plus rigoureusement aux conditions de résistance indiquées par les lois de l'observation.

Les Gouvernements, les Compagnies de chemins de fer, les Constructeurs, ont donc introduit, dans les cahiers des charges, des conditions de réception plus rigoureuses, forçant ainsi les producteurs à baser leur fabrication sur des modes d'investigation méthodiques et suffisamment scientifiques.

Les difficultés qui se soulèvent quelquefois entre les producteurs et les consommateurs, à propos des matériaux employés dans les constructions, peuvent être des plus sérieuses et des plus importantes. Il s'agit, en effet, dans bien des cas, d'accidents ayant été cause de morts et de blessés et, par suite, se trouvent engagées de graves responsabilités correctionnelles, de lourdes responsabilités civiles.

Les intérêts du producteur et du consommateur sont donc ici les mêmes, et tous doivent désirer les progrès de cette partie de la science, qui comprend la recherche des propriétés physiques, chimiques et mécaniques des matériaux.

Il faut bien reconnaître aussi que, pour opérer la réception des produits nécessaires à la construction, on se trouve en présence de difficultés spéciales.

Presque toujours on ne peut essayer les pièces dans les conditions de travail qu'elles auront à supporter ; il faut donc imaginer des méthodes d'essais qui fassent reconnaître la qualité réclamée par la pratique, en soumettant les pièces à des efforts absolument différents de ceux qu'elles subiront une fois en service.

Il est nécessaire aussi que les essais exécutés sur un certain nombre de pièces, prélevées dans chaque livraison, permettent d'espérer que toute la fourniture jouira des propriétés mécaniques trouvées dans les expériences.

Pour les constructions métalliques, les essais les plus ordinaires opérés par la

pratique sont : les essais à la traction, à la compression, à la flexion, à la torsion, les essais aux chocs et au cisaillement.

Dans les essais à la traction, qui sont de beaucoup les plus répandus, nous avons vu, dans le commencement de ce rapport, que l'on cherche à mettre en évidence les principales qualités physiques et mécaniques du métal, son élasticité, sa résistance vive d'élasticité ou de rupture, indiquée pour la première fois par Poncelet; puis sa résistance, son allongement et sa striction à la rupture.

Ces résultats varient pour le même métal avec :

La forme générale de l'éprouvette;

La disposition relative du corps principal et des têtes;

La section transversale et même les dimensions de cette section;

La longueur sur laquelle on mesure les allongements;

La lenteur ou la rapidité de l'expérience, c'est-à-dire la variation du temps pendant lequel on opère l'application des efforts successifs;

Le mode d'attache de l'éprouvette;

La direction de l'application de la force par rapport à l'axe de l'éprouvette;

Le système de la machine d'essais.

Nous avons cherché à démontrer, dans ce rapport, que les connaissances exactes que nous possédons sur la théorie moléculaire des solides sont tellement restreintes, que, si dans deux séries d'expériences opérées avec le même métal, on change seulement un des éléments, la longueur utile de l'éprouvette, ou les dimensions de la section, etc., il est impossible de comparer les résultats avec certitude.

Les lois empiriques, que beaucoup d'ingénieurs ont recherchées, pour relier quelques-uns de ces éléments entre eux, ne donnent, d'après les renseignements que nous avons fournis dans cette étude, qu'une approximation par trop insuffisante, quand on veut les appliquer à des métaux de même espèce, mais de fabrication différente de ceux qui ont servi de base aux essais de ces savants chercheurs.

Nous avons même prouvé que la méthode généralement suivie, dans les essais à la traction, pour ramener la charge de rupture à la section primitive ou à la section de rupture de l'éprouvette, donne des résultats absolument erronés.

Enfin, nous avons, par quelques extraits seulement des principaux travaux sur l'élasticité, montré suffisamment que, pour cette question si grave et si importante en construction, les idées anciennes ne sont plus admissibles, et que les idées nouvelles n'ont pas encore reçu suffisamment la sanction de la pratique pour être universellement acceptées.

Les difficultés que nous venons d'exposer, pour les expériences à la traction, se présentent pour toutes les autres espèces d'essais; il en résulte que ces admirables séries d'expériences faites en Angleterre, en Suisse, en Russie, aux États-

Unis, en Autriche, en Allemagne et en France, ne sont pas comparables, et que cette somme immense de patience et de travail est, en majeure partie, perdue pour l'avancement de la science et les perfectionnements de la construction.

Un point capital, qui rend aussi très pénible la consultation des travaux étrangers, consiste dans ce fait que chaque pays n'a pas adopté les mêmes unités pour exprimer les résultats. Un ingénieur anglais, par exemple, qui veut se rendre compte des magnifiques travaux entrepris par les usines françaises du Creusot, Terre-Noire, Châtillon et Commentry, Saint-Étienne, etc., pour la classification des aciers, doit se livrer à la transformation des unités françaises en unités anglaises, travail des plus longs, des plus pénibles et des moins intéressants.

On peut dire que le choix des *Unités internationales* aurait, sur l'avenir de la métallurgie, une aussi grande influence que le choix des unités électriques, au Congrès international de 1881, en a eu sur les progrès et la vulgarisation des travaux sur l'électricité.

Il apparaît donc, comme une nécessité de premier ordre, de réunir un *Congrès international* ayant pour mission de fixer, au point de vue de la résistance des matériaux, les unités de mesures, les dimensions et formes à prescrire pour les éprouvettes ou les différents échantillons, suivant le genre de l'essai, la discussion au moins, sinon l'adoption, des principes de machines à essayer, la détermination de règles précises pour les détails des différents essais.

En France déjà, lors de l'Exposition universelle de 1878, à la session de l'Institut du fer et de l'acier, la question avait été soulevée incidemment, et nos principaux métallurgistes, MM. Tresca, Jordan, Barba, Marché, Euverte, Gautier, etc., réclamèrent ce congrès international.

La Société des Ingénieurs civils de Paris, dans plusieurs de ses séances, a approuvé les conclusions de nombreux travaux proposant une entente générale pour que les essais de résistance deviennent immédiatement comparables.

L'Institut du fer et de l'acier, dans sa session de 1882, à Vienne, a repris cette question : MM. Snelus, Wedding, Isaac Lowthian Bell, déclarent qu'il est de première importance d'arriver à la réunion d'une Commission internationale.

Différents États ont déjà reconnu officiellement ou officieusement des laboratoires d'essais pour chercher précisément à établir, au moins dans leur pays, une uniformité indispensable.

En France, le laboratoire d'essais du Conservatoire des Arts et Métiers, sous l'habile direction du général Morin, de M. Tresca et du colonel Laussedat, a rendu d'éminents services à l'industrie.

Le Président des États-Unis, par différentes décisions, prises en 1875 et 1876, a institué le *Bureau des Essais des États-Unis* pour le fer, l'acier, etc.

La Russie a deux laboratoires gouvernementaux, celui de Saint-Pétersbourg et celui de Moscou,

En Prusse, la loi du 23 janvier 1880 règle la constitution définitive des Instituts d'essais, dont celui de Berlin est le modèle; Munich a aussi une installation analogue.

La Belgique possède le laboratoire et les ateliers d'essais de Malines.

Dès 1875, l'Association des Ingénieurs et Architectes autrichiens demandait, au Ministre du commerce, la création d'un laboratoire d'essais, destiné à assurer une uniformité dans les expériences, absolument nécessaire à la théorie et à la pratique.

La Suisse, dans le même but, a installé à Zurich un laboratoire fédéral pour les épreuves dynamiques.

Dans le Congrès de 1887, l'Union des Chemins de fer allemands déclare : « qu'une Commission spéciale vient de publier un projet de règlement pour « assurer l'uniformité des essais de résistance des divers matériaux de construction. »

En 1884, sous l'inspiration, je crois, du savant professeur de Munich, M. J. Bauschinger, se réunissaient à Munich un grand nombre de savants, de professeurs, d'ingénieurs, de constructeurs principalement d'Allemagne, d'Autriche et de Suisse, dans le but : *d'établir des règles fixes pour les Méthodes à suivre en essayant les matériaux de construction dont on veut connaître les qualités mécaniques.*

Une nouvelle conférence a été tenue à Dresde, en 1886, et une Commission de rédaction a publié tous les documents recueillis sur les différentes questions soulevées dans ces réunions.

En 1888, une troisième conférence devait se réunir à Berlin.

Je serais heureux, Messieurs, si j'étais parvenu, par ce modeste travail, à vous démontrer, d'abord la nécessité d'un Congrès international pour établir l'uniformité des essais de résistance des matériaux, et, ensuite, combien cette réunion est désirée par les Sociétés scientifiques les plus autorisées, par les hommes les plus compétents de tous les pays.

Je ne puis terminer, sans vous rappeler, Messieurs, que la science de la résistance des matériaux a été créée par des savants français, les Navier, Poncelet, Morin, Tresca et Wertheim, et, qu'à ce titre, il est tout naturel que notre pays prenne l'initiative d'un Congrès international, qui seul peut permettre d'espérer voir la théorie mécanique moléculaire sortir de l'obscurité et des ténèbres qui l'entourent encore.

VŒU.

J'ai donc l'honneur de vous prier d'émettre le vœu suivant :

« Les Membres du Congrès de mécanique appliquée, après en avoir délibéré, « émettent le vœu que le Gouvernement français prenne, auprès des Gouverne-

« ments étrangers, l'initiative de la réunion d'une commission internationale, « ayant pour mission de choisir les unités communes destinées à exprimer les « différents résultats des essais de matériaux, et d'introduire une certaine uniformité dans les méthodes d'essais. »

Ce vœu est adopté à l'unanimité.

LABORATOIRES DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE.

L'étude de toutes les sciences comporte un enseignement théorique et un enseignement pratique; une seule faisait exception jusque dans ces dernières années, la mécanique appliquée.

La mécanique a devant elle un champ d'études et de découvertes absolument illimité, aucune branche des sciences n'a peut-être rendu plus de services à l'humanité, et pourtant il semble qu'il n'y ait pas besoin pour cette science d'étudier les machines elles-mêmes, d'apprendre aux ingénieurs à expérimenter, à rechercher la vérification des théories générales apprises dans les cours, à contrôler les résultats plus ou moins fantastiques avancés par certains inventeurs qui se laissent si facilement éblouir.

On oublie trop que le caractère et l'intelligence de l'Ingénieur ne peut se développer que dans un laboratoire de recherches; il ne suffit pas d'avoir l'esprit rempli, d'une façon plus ou moins indigeste, par des théories brillantes pour être un véritable ingénieur-mécanicien, il faut aussi savoir rechercher dans quelles limites ces théories sont applicables à la pratique, trouver les causes des différences, apercevoir les progrès pour l'avenir, posséder, en un mot, cet esprit de recherches qui seul peut développer l'initiative et l'activité industrielle. Tel est le vrai but de l'ingénieur-mécanicien.

Un laboratoire de mécanique appliquée est donc tout aussi obligatoire pour les ingénieurs, que les laboratoires de physique et de chimie, pour les physiciens et les chimistes, l'amphithéâtre pour les médecins, etc..., « c'est là, dit avec raison Kennedy, qu'il acquiert ce scepticisme salutaire à l'égard des généralisations dépourvues de critique et des affirmations dépourvues de contrôle. »

Je sais bien qu'un certain nombre de théories que l'on donne très régulièrement dans les cours dits d'application, ne résisteraient pas à ces investigations des élèves. Les fameuses théories de la machine à vapeur, les lois du frottement, les formules pour l'écoulement des vapeurs dans les conduites, un grand nombre de formules sur la résistance des matériaux, etc..., seraient dans ce cas, mais ne faut-il pas mieux que le jeune ingénieur sache justement qu'il ne doit accorder qu'une confiance limitée à telle ou telle partie de la science, que de s'imaginer que tout est su, connu, prouvé, et que, si la pratique lui donne, dans les premières

applications qu'il fera de ces théories, des résultats absolument contradictoires à ceux soi disant prévus par la théorie, c'est la faute de la pratique.

Un véritable ingénieur doit d'abord posséder une science théorique aussi étendue que possible, mais il doit aussi, avant de se lancer dans la pratique industrielle de tous les jours, appliquer les procédés d'investigations que ses professeurs lui ont fait connaître, où pourra-t-il le faire, s'il n'a pas à sa disposition un laboratoire très complet?

M. Kennedy avait donc parfaitement raison quand il disait à ses élèves :

« Il semble reconnu dès maintenant, qu'un laboratoire de mécanique est une « partie essentielle de toute institution qui a la *prétention* de former des ingénieurs. »

M. Dwelshauvers-Dery, le savant professeur de l'Université de Liège, me paraît être le premier qui demanda à son Gouvernement, le 28 mai 1870 : « de créer à Liège un laboratoire d'expériences mécaniques, une école d'expérimentateurs au sein de l'école de théorie. »

Ami personnel de Hirn, Dwelshauvers n'avait pas hésité à aller travailler avec lui, pour étudier les méthodes alsaciennes d'essais des moteurs à vapeur ; il confia à Hirn ses idées sur la nécessité des laboratoires de mécanique appliquée, et Hirn s'exprimait ainsi dans un rapport de 1875 à la Société Industrielle de Mulhouse :

« Dwelshauvers-Dery avait conçu une idée grande et utile : celle de fonder « auprès de l'université où il professe, un laboratoire de physique et de mécanique industrielles, où les jeunes gens pussent étudier en grand et sur le vif, et « produire déjà ainsi des résultats utiles tout en étudiant. »

Ces laboratoires, pour être réellement utiles, doivent comprendre les machines nécessaires à l'étude de la résistance et de l'élasticité des métaux, ou autres matériaux de construction, des machines à vapeur, à gaz, à air chaud, des chaudières à vapeur et tous les instruments nécessaires aux essais calorimétriques ; des appareils pour mesurer les frottements, le travail des courroies, des câbles..... pour étudier les lois des mouvements des fluides dans les tuyaux ou conduits, pour les recherches du pouvoir calorifique des combustibles, etc. ; enfin tous les dynamomètres permettant l'étude des forces et du travail nécessaires aux différentes machines de l'industrie, etc.

On voit qu'il ne faut pas confondre ces laboratoires avec ceux que possèdent quelques établissements en France, soit pour faciliter les études et les recherches personnelles des professeurs, comme celui du Conservatoire qui existait du vivant de M. Tresca, ou pour obtenir les renseignements spéciaux nécessaires à certaines industries, comme les laboratoires de nos grandes Compagnies de chemins de fer, des arsenaux de l'Artillerie et de la Marine, du Creusot, Denain, Saint-Étienne, etc.

Peu de temps après la démarche de M. Dwelshauvers-Dery, en 1871, M. Bauschinger érigea un laboratoire de mécanique appliquée à Munich ; dans la même année, le Gouvernement allemand en ouvrit un à Berlin. Ces deux laboratoires étaient surtout organisés au point de vue de l'étendue de la résistance des matériaux. Ce fut seulement en 1876 que M. Linde installa à Munich un laboratoire d'essais pour les machines.

Voici du reste, quel était en 1888, l'état des divers laboratoires de mécanique appliquée dans les différents pays, avec leur date d'ouverture. Tous ces établissements sont annexés à des écoles techniques :

- 1843. — Paris. — École des ponts et chaussées. — Essais des matériaux de construction, excepté les métaux.
- 1871. — Munich. — Essais des métaux et des matériaux de construction.
- 1871-1880. — Berlin. — Essais des métaux et des matériaux de construction. — Essais des huiles. — Essais des papiers. — Laboratoire photographique et microscopique.
- 1876. — Munich. — Essais des machines.
- 1877. — Prague. — Essais des métaux et des matériaux de construction.
- 1877. — Zurich. — Essais des métaux et des matériaux de construction.
- 1878. — Londres. — University Collège, professeur Kennedy. — Essais des métaux et des matériaux de construction. — Essais calorimétriques. — Essais dynamométriques. — Essais des frottements. — Laboratoire photographique.
- 1879. — Worcester (E.-U.). — Essais des métaux. — Essais dynamométriques.
- 1880. — Liège. — Machine à vapeur et chaudière pour expériences.
- 1880. — Chemnitz. — Essais des métaux et des matériaux de construction.
- 1882. — Birmingham. — Essais des matériaux, machine à vapeur et chaudière pour expériences. — Appareil pour mesurer les résistances des outils tranchants. — Frottement.
- 1882. — Buda-Pesth. — Essais des métaux et des matériaux de construction. — Essais dynamométriques.
- 1883. — Cooper's Hill. — Essais des métaux, ciments. — Essais des huiles, machine à vapeur et à gaz.
- 1883. — Bristol. — Essais des métaux. — Essais des huiles. — Essais des ressorts, flexion des poutres. — Machine à gaz.
- 1883. — Boston (E.-U.). — Essais des métaux et des matériaux de construction. — Essais calorimétriques. — Essais des courroies. — Essais dynamométriques.
- 1883. — Minneapolis (E.-U.). — Essais des métaux et des matériaux de construction. — Essais dynamométriques.

1884. — Londres. — Professeur Unwin. — Essais des métaux, ciments. — Essais calorimétriques. — Expériences d'hydraulique. — Laboratoire photographique.
1884. — Stuttgard. — Essais des métaux et des matériaux de construction.
1884. — Sydney. — Essais des métaux.
1886. — Leeds. — Essais des métaux. — Essais calorimétriques. — Expériences de mécanique générale. — Laboratoire photographique.
1888. — Ithaca (E.-U.). — Essais des métaux et des matériaux de construction, des huiles. — Essais dynamométriques. — Expériences sur l'écoulement de l'eau.

Enfin, on était en train d'installer aux États-Unis des laboratoires de mécanique : à Cambridge (Massachussets) — à New-Haven (Connecticut) — à Saint-Louis — à New-York et à Victoria, pour l'Université de Melbourne, en Australie.

Il existe encore un grand nombre de laboratoires qui sont rattachés à des écoles supérieures, mais dont il est difficile d'indiquer la date de création.

PARIS. — *Conservatoire des Arts et Métiers.* — Le laboratoire où M. Tresca a fait ses magnifiques expériences sur l'écoulement des solides, l'élasticité, les machines à air et à gaz, a disparu depuis sa mort.

DRESDE. — Laboratoire de technologie, relatif aux industries textiles et du papier, du Dr Hartig.

VIENNE. — Essais des métaux et étude de leur déformation.

SAINT-PÉTERSBOURG. — Le professeur Sobko avait, dès 1853, installé une machine à essayer les bois et les pierres. En 1877, on installa une machine à essayer les métaux.

STOCKHOLM. — On était en train d'installer un laboratoire pour l'École Polytechnique de cette ville.

HOBOKEN. — (E.-U.). — Ce laboratoire fut établi en 1876, dans un but commercial, mais plus tard il servit aussi à l'enseignement.

Une question importante a été soulevée au point de vue de la création de ces laboratoires : doivent-ils être fondés par les administrations gouvernementales ou par l'initiative privée ?

Il est évidemment très désirable que toutes les écoles techniques supérieures fondent un laboratoire de mécanique appliquée; dans les pays où ces écoles relèvent directement du Gouvernement, il me paraît difficile de trouver mauvais que l'Administration établissent ces laboratoires.

Mais là, à mon avis, devrait se résumer l'intervention des Administrations dans cette question, et, pour ma part, j'aimerais beaucoup mieux que ce soit l'initiative privée qui prit en mains cette question si grave pour l'avenir de l'industrie! Du reste, comparant les résultats obtenus en Angleterre et aux États-Unis par l'initiative privée, et les difficultés sans nombre qu'a dû vaincre un de nos collègues, qui a mis dix-neuf ans pour convaincre son Gouvernement de l'utilité de cette création, et la question me paraîtra absolument jugée.

VŒU

J'ai donc l'honneur de vous proposer d'émettre le vœu suivant :

« Il y a lieu de signaler aux ingénieurs, aux industriels et à toutes les personnes intéressées au développement de la mécanique, la nécessité de créer « des laboratoires de mécanique appliquée, comme annexes aux écoles techni- « ques supérieures. »

SUR L'UNIFICATION des MÉTHODES d'ESSAIS

DES

MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

PAR

M. MICHEL SVILOKOSSITCH

Double but des essais des matériaux de construction.—Produits utilisés à l'état naturel ; rappel des travaux récents sur la résistance des pierres, ciments, bois, etc. — Produits métallurgiques. — Nécessité d'une nomenclature uniforme des métaux ferreux.—Définition des fers et aciers au moyen de leurs propriétés résistantes et par la faculté de prendre ou non la trempe ; antagonisme qui existe entre producteurs et consommateurs. — Mesure de la ténacité de ses produits ferreux ; propositions de Kirkaldy, Wöhler, Tetmajer, etc. — Impossibilité d'arriver à définir la ténacité sans un accord préalable entre les intéressés, et autant que possible international. — (Digression sur le point de vue auquel se sont placés récemment les métallurgistes allemands et conséquences regrettables qui en découlent).—Points de vue théoriques : détermination de la limite d'élasticité ; résistance aux efforts répétés un grand nombre de fois ; élasticité remanente ; loi des résistances proportionnelles énoncée par Vicat, confirmée et mieux formulée par Kick. — Vaste champ d'expérience qui reste encore à parcourir.

Dans les conditions d'essais actuels il est impossible de posséder des résultats comparables. — Influences nombreuses d'où dépend l'exactitude d'une série d'expériences. — L'essai à l'extension pris comme type. — Les essais aux chocs méritent une plus grande attention que par le passé.

Laboratoires d'essais : Etablissements scientifiques et stations industrielles. — Faut-il attendre la création des premiers de l'initiative privée ? — Organisation à l'étranger des laboratoires officiels.

On fait des essais des matériaux de construction dans un double but : 1^o pour s'assurer qu'une matière donnée est capable de résister aux efforts qui lui seront

appliqués en service ; et 2° pour se rendre compte de la meilleure utilisation d'un produit employé soit à l'état naturel, soit après avoir été modifié artificiellement. Nous n'envisageons pas les essais qui rentrent dans la catégorie des expériences scientifiques et qui sont destinés à éclaircir quelque point encore obscur de la théorie de l'élasticité.

La grande classe des produits employés à l'état naturel (pierres, bois, etc.) n'ont pas été l'objet d'un nombre assez considérable de recherches expérimentales depuis quelques années, pour que nous ayons à nous en occuper ici. On peut dire, en effet, que les méthodes, en usage du temps de Rondelet et de ses continuateurs immédiats pour l'essai des pierres, suffisent presque aux besoins techniques de nos jours. Toutefois, les percements des grands tunnels dans les roches compactes ont conduit les ingénieurs à étudier les roches suivant leur résistance au forage, et cette méthode d'essais, indiquée dans ses traits essentiels par Coquilhat en 1851, paraît de nature à fournir des renseignements très utiles. Sans nous étendre davantage sur cette méthode, nous rappelerons qu'elle est basée sur la détermination du travail qui est nécessaire pour le forage de l'unité de volume d'une pierre donnée.

En ce qui concerne les bois, on a fait, dans ces dernières années, des essais dans le but d'étudier la résistance à la compression longitudinale, recherches qui, dans leur ensemble, n'ont fait que confirmer les règles jusqu'ici admises.

Quant aux matériaux de construction qui occupent une place intermédiaire entre ceux qu'on emploie à l'état naturel et ceux qui subissent des manipulations mécaniques ou des transformations chimiques, l'étude des procédés d'essais et de fabrication de ces matériaux, ayant fait partie du programme d'un autre Congrès, nous croyons devoir nous abstenir d'en parler, et nous passerons immédiatement aux produits des usines métallurgiques, et notamment au fer et à l'acier.

Dès que l'on aborde l'étude des propriétés résistantes de ces produits, une question préjudiciale doit être résolue. C'est la question concernant la classification du fer et de l'acier.

Une grande confusion règne en effet sur les dénominations servant à distinguer les fers des aciers. Certains métallurgistes considèrent tout produit métallurgique comme étant du fer s'il est obtenu par le procédé de soudure ou de mise en paquets, et donnent le nom de l'acier aux produits obtenus par la voie de fusion. C'est ainsi que l'on parle couramment de l'acier Bessemer, Martin-Siemens, etc., sans se demander si certains des produits ainsi dénommés ne rentrent pas plutôt dans la catégorie du fer, vu leur incapacité de prendre la trempe. D'autres métallurgistes estiment que la qualité de prendre la trempe est seule caractéristique des aciers, et désignent le fer peu carburé qui se rapproche le plus de l'acier par le nom de « fer fondu » (acier doux), expression qui peut prêter à la confusion, tout au moins en français.

Mais, quelle que soit la valeur de toutes ces définitions, on ne peut pas s'empêcher de regretter une discordance qui, bien souvent, n'est due qu'à des considérations absolument étrangères à la Science de l'ingénieur. Et, sans préjuger les décisions de l'avenir, il nous semble que la classification établie par les métallurgistes réunis au Congrès de Philadelphie, en 1876, constitue un pas en avant dans la voie qui conduira à la solution de cette question épineuse.

Indépendamment du procédé métallurgique qui sert à la fabrication d'un composé ferreux et de la teneur en carbone de celui-ci, on peut, pour les usages purement mécaniques, établir une classification basée sur les propriétés résistantes et sur les qualités élastiques des fers et des aciers. Les premières peuvent toujours être évaluées au moyen de la charge de rupture à l'extension ou à la flexion, selon le mode d'emploi de la pièce, ainsi que de la limite d'élasticité pour les matières qui la possèdent. Quant à la définition des qualités élastiques ou, plus exactement, de la ténacité d'un composé ferreux, on sait que les expérimentateurs sont loin d'être d'accord sur ce sujet. Les uns veulent, à la suite de Kirkaldy, définir la ténacité au moyen de la contraction d'une barre d'essai en pour cent de sa section primitive et au moment de la rupture par extension ; d'autres se contentent de prendre pour base de cette détermination l'allongement que présente la barrette par rapport à sa longueur primitive. D'autres encore déterminent la ténacité au moyen d'essais aux chocs.

Nous rencontrons là déjà une manifestation de l'antagonisme qui existe nécessairement entre les producteurs et les consommateurs du fer et de l'acier. Au point de vue où se placent les premiers, vouloir exiger un certain pour cent de contraction de la barrette, c'est autoriser les agents réceptionnaires à rebouter souvent des échantillons qui, tout en étant utilisables, présentent cependant quelque défaut local (pailles, gerçures, etc.) dû aux manipulations mécaniques ou, pour les matières homogènes, à celles-ci aussi bien qu'au retrait du métal en fusion pendant son refroidissement.

D'autre part, les consommateurs veulent bien se contenter d'un minimum d'allongement pourvu qu'il ne soit pas obtenu aux dépens de la ténacité de la matière, qui est certainement mieux définie par la faculté qu'elle possède de pouvoir se contracter sous une charge donnée que par celle de pouvoir s'allonger.

Cependant les réclamations des métallurgistes tendant à l'abandon, dans les cahiers des charges, de la clause exigeant un certain pour cent de contraction ne sont pas restées sans écho, et on leur doit le revirement qui s'est produit en faveur des producteurs, même dans les pays, comme l'Allemagne par exemple, où il était de règle, lors de la réception de matériel de chemins de fer, d'exiger de chaque barrette d'essai un certain nombre de qualité représenté par la somme de la charge de rupture en kilogramme par millimètre carré et de la contraction en pour cent de la section primitive. Pour donner satisfaction aux réclamations dont il s'agit, le ministre des travaux publics de Prusse a institué il y a quel-

ques années une Commission composée de représentants de tous les intéressés dans la question à l'effet d'étudier les modifications à introduire dans les cahiers des charges pour la réception de matériel de chemins de fer.

Cette Commission a conclu récemment dans le sens favorable aux métallurgistes, en recommandant de ne tenir compte à l'avenir que de la charge de rupture déterminant la résistance d'une matière, tantôt à l'extension (pour rails et essieux) et tantôt à la flexion (pour traverses métalliques, éclisses, etc), la ténacité devant être constatée au moyen d'essais aux chocs.

On peut regretter cette décision à plus d'un point de vue. Nous estimons que les essais aux chocs sont indispensables dans beaucoup de cas, et il en sera question plus loin. Mais supprimer complètement l'indication de l'un des éléments considérés jusqu'ici comme très important (allongement de rupture ou contraction), même dans les essais de matériel de chemin de fer où les chocs jouent certainement un rôle prépondérant, nous semble très illogique. On aurait pu, pour être conséquent, supprimer entièrement les essais à l'extension ou à la flexion, dans le cas des bandages par exemple, et se contenter uniquement des essais aux chocs, puisque c'est sous l'influence des chocs que la plupart des bandages sont rompus en service.

Ce manque de conséquence est d'autant plus évident que les métallurgistes allemands ont accepté les propositions de l'Association des Sociétés des ingénieurs et des architectes d'Allemagne relatives aux essais du fer et de l'acier rentrant dans la construction des ponts et charpentes. Dans ce cas on exigera, à l'avenir comme par le passé, toujours un minimum d'allongement, ainsi que cela se fait en France et dans la plupart des pays.

Il est évident, d'après ce qui précède, que la mesure de la ténacité des métaux ferreux manque encore d'une base scientifique. Pour concilier les deux intérêts contraires en présence ainsi que pour combler une lacune de la résistance des matériaux, plusieurs savants ont proposé des formules au moyen desquelles on pourrait définir la ténacité des matières. C'est ainsi qu'un savant expérimentateur connu M. Tetmajer, directeur du laboratoire d'essais de Zurich, a proposé de prendre pour mesure de la ténacité d'une matière sa capacité de travail exprimée par la formule suivante :

$$x = \eta \frac{T}{lS},$$

dans laquelle T est le produit de la charge de rupture par l'allongement sur 100 millimètres, l la longueur primitive et S la section primitive de la barre d'essais, η un coefficient numérique supposé constant pour la même matière. Cette proposition est adoptée en principe par la Société des ingénieurs et des architectes suisses et semble être prise pour base d'une classification officielle des produits ferreux employés en Suisse.

Mais quoique théoriquement rationnelle, puisqu'elle est basée sur la considé-

ration du travail effectué pendant la rupture de la pièce au moyen d'un effort de traction, cette formule présente un grave défaut. Elle fait entrer dans la détermination de la qualité d'un produit métallurgique un coefficient variant nécessairement avec les progrès de l'industrie et elle suppose, en outre, un accord préalable entre les producteurs et les consommateurs, accord qui n'est pas toujours aisément à réaliser.

Les considérations précédentes sont de nature essentiellement pratiques. La théorie pourtant exige que l'on tienne compte de l'élasticité d'une matière, puisque les formules de la résistance des matériaux ne sont, pour la plupart, valables que tant que l'élasticité de la matière n'est pas altérée. Il est donc de toute nécessité qu'on soit fixé sur la mesure de l'élasticité. Dans la plupart des traités des matériaux de construction, on enseigne que la mesure de l'élasticité d'une matière est donnée par la charge correspondant à la limite d'élasticité. Or le plus souvent il est assez difficile de déterminer cette limite. Elle varie quelquefois avec les expérimentateurs et avec la plus ou moins grande exactitude de leurs appareils de mesure des déformations.

Pour certaines matières, elle n'existe même pas, ou tout au moins ce qu'on désigne par la limite d'élasticité des matières cassantes, n'est qu'une limite des erreurs dans l'enregistrement des déformations permanentes. Certaines matières ductiles admettent une limite d'élasticité inférieure et une limite d'élasticité supérieure. En outre la forme de la section des barrettes d'essai peut également influer sur la fixation de cette limite, puisque plusieurs expérimentateurs l'ont trouvée plus grande pour des barrettes de section ronde que pour des barrettes de section carrée.

Lorsqu'il s'agit de métaux ductiles, on peut, il est vrai, définir la limite d'élasticité comme une limite de proportionnalité entre les efforts et les déformations, sans que cependant cette limite puisse être acceptée comme invariable (1).

Nous n'avons envisagé jusqu'ici que les charges appliquées une seule fois. Mais pour l'étude complète de la résistance des matériaux, il est indispensable de connaître également la manière dont ils se comportent sous l'influence des efforts de même sens ou de sens contraire répétés un certain nombre de fois.

Or, malgré les belles expériences de Fairbairn, Woehler, Bauschinger, Considère et autres, un grand nombre de problèmes qui se rattachent à cette question attendent encore leur solution définitive. On a fait, il est vrai, une objection qui peut paraître judicieuse, aux conclusions tirées des résultats d'essais des pièces soumises à des charges répétées un grand nombre de fois, en disant que la ma-

1. Dans une remarquable discussion qui a eu lieu en 1884 devant la Société des Ingénieurs civils, on s'est beaucoup occupé du rapport entre la limite d'élasticité et le coefficient du travail de l'acier; on y a notamment mis en évidence ce fait que les essais les plus minutieux fournissent la limite d'élasticité la plus basse.

tière est beaucoup plus fatiguée sous l'influence d'une charge permanente que sous celle des charges de même sens appliquées et enlevées successivement.

Pour appuyer ce raisonnement on s'est autorisé d'une propriété de la matière, encore bien peu étudiée, et que l'on a appelée l'*élasticité remanente*. Il nous semble encore trop prématûr pour conclure dans un sens plutôt que dans l'autre ; toutefois si le raisonnement dont il s'agit a quelque valeur, il est très rassurant au point de vue de la stabilité de la plupart des constructions métalliques.

Quant aux efforts de sens contraires, on ne peut pas mettre en doute qu'une bielle ou manivelle, tantôt tendue, tantôt comprimée, est beaucoup plus fatiguée qu'un organe de machine sollicité toujours dans le même sens. D'ailleurs les praticiens savent depuis longtemps ce qu'il faut tenir des coefficients de sécurité, lorsqu'il s'agit de calculer les dimensions des organes de machines animés d'un mouvement de va-et-vient.

Enfin pour ne pas passer sous silence des recherches assez importantes, nous mentionnerons la nécessité de vérifier la loi des résistances proportionnelles énoncée par Vicat et formulée depuis avec plus de précision par M. Kick.

Il nous semble résulte de l'exposé rapide des quelques problèmes intéressant la résistance des matériaux que l'étude de certaines des qualités résistantes des matériaux de construction est encore à faire, et que, de plus, cette étude ne pourra donner de bonnes indications qu'autant que nos méthodes d'essais puissent fournir des résultats comparables.

Il est donc intéressant de connaître les circonstances qui influent sur l'exactitude d'un essai de résistance. Nous allons les rappeler brièvement.

En faisant abstraction de l'habileté de l'expérimentateur et de la bonne construction des machines d'essais, on peut indiquer les points suivants à observer pour qu'un essai puisse donner des résultats utilisables :

1^o *Longueur de la barette d'essai*. — On doit, autant que possible, donner aux barrettes d'essais, qui portent sur des matières semblables de forme et de fabrication, une longueur uniforme. Il nous suffit de renvoyer au beau mémoire présenté par M. Barba (les travaux de M. Barba ont été la confirmation des expériences de MM. Marché, Marié et plusieurs autres expérimentateurs) à la Société des Ingénieurs civils en 1880, pour n'avoir pas à insister sur ce point. Cette condition primordiale ne se trouve pourtant pas indiquée dans les cahiers des charges de nos grandes Compagnies de chemins de fer par exemple. C'est ainsi que le cahier des charges de la Compagnie du Nord, un des mieux rédigés que nous ayons pu consulter, porte que, pour les tôles et les fers de forge de section prismatique, la longueur des barrettes doit être de 200 millimètres, tandis qu'elle est pour les fers de forge de section circulaire 8 fois le diamètre de la section et qu'elle n'est pour les échantillons d'acier que de 100 millimètres.

En suivant ces prescriptions, il serait par exemple très difficile de com-

rer la résistance d'une tôle en fer soudé et d'une tôle en acier, car même en appliquant la proposition suivant laquelle les allongements sont proportionnels aux longueurs des barrettes, on ne pourrait pas, pour toutes les sections qui sont nécessairement variables, obtenir des résultats comparables. Et cependant, ainsi que l'a écrit M. Le Basteur en 1878 (1) « si l'on ne finit pas par s'entendre sur ce point important, tous les efforts accumulés pour caractériser et classer les métaux ferreux au moyen de leurs éléments de résistance à la traction seront frappés de stérilité. »

2^o Nous venons de dire que la *section des barrettes d'essai* ne peut pas être rendue uniforme. Il est bon, pour chaque espèce de métal essayé, de déterminer au préalable le meilleur rapport entre la plus petite dimension de la section transversale et la longueur des barrettes. Dans le cas de tôles minces on est limité par leur épaisseur et on ne peut que varier la largeur des barrettes. Mais il est indispensable, dans tous les cas, d'indiquer dans les tableaux donnant les résultats des essais les sections des barrettes essayées.

3^o La *préparation des barrettes d'essai* doit être entourée de précautions spéciales. Autrefois on se contentait de les découper grossièrement, quelquefois au marteau, où cela était praticable. Aujourd'hui l'habitude se répand de plus en plus de les découper à l'aide de machines-outils. Lorsqu'il s'agit des fers en T, I, U etc., il est à recommander de ne jamais découper les barrettes dans les âmes et de laisser toujours subsister sur les fers laminés, la couche extérieure due au laminage.

4^o La manière dont les *barrettes sont maintenues* dans les machines d'essais varie beaucoup suivant les cas. Pour les tôles et les barrettes plates en général, le seul mode rationnel de fixation consiste à élargir les barrettes vers les deux extrémités et à percer à chaque bout un trou dans lequel on introduit le boulon de fixation. Pour les barrettes rondes on peut se servir soit de coins, soit de têtes taraudées (ce dernier mode est adopté par les Conférences de Munich et de Dresde pour l'Unification des méthodes d'essais). Mais dans tous les cas il faut que l'effort appliqué agisse suivant l'axe géométrique de la barrette. Cette fixation est rendue assez facile en donnant aux extrémités la forme demi-sphérique. Lorsqu'on omet d'observer cette précaution, la moindre excentricité de l'effort peut produire un moment de flexion qui vicie complètement le résultat de l'essai, et on peut certainement attribuer à ce fait la plupart des discordances que l'on trouve parfois dans les résultats d'essais faits par les mêmes expérimentateurs.

Il nous resterait encore à énumérer certaines circonstances secondaires dont il faut tenir compte lors des essais des matériaux de construction. C'est ainsi que la question de la durée de l'expérience (2) et de la température à laquelle elle se

1. *Les métaux à l'Exposition universelle de 1878.* Paris 1878, p. 30.

2. Les travaux récents de M. Connert ont attiré l'attention sur ce sujet.

fait a préoccupé quelques expérimentateurs. Nous ne croyons pas devoir insister la-dessus et nous passerons également sous silence les différents essais de pliage, de trempe, de poinçonnage, etc., qui varient souvent et rendent plus difficile la comparaison des résultats d'essais. Ils supposent en outre des ouvriers très habiles dont le nombre diminue de plus en plus. Les essais aux chocs nous semblent mériter qu'on s'y arrête davantage.

Dans le pays producteur du fer par excellence, en Suède, le bureau métallurgique officiel et renommé, le « Jernkontoret », prescrit des essais aux chocs dans la plupart des cas où nous croyons pouvoir nous en dispenser. En France d'ailleurs ainsi que dans d'autres pays, on exécute des essais aux chocs pour éprouver les pièces et les organes de machines qui seront soumis aux chocs pendant le service. Ce qui a diminué la valeur de ces essais aux yeux de certains théoriciens, c'est la manière encore primitive dont on exécute ces essais dans la plupart des laboratoires. Il nous semble cependant que l'abandon de ces essais dans le cas de réception des poutres entrant dans la construction des ponts n'est pas justifié, surtout si, comme cela paraît probable, on donne une plus grande extension à l'acier dans la construction des ponts et charpentes.

En citant l'organisation officielle de Suède pour les essais des produits métallurgiques, et sans nous attarder à rappeler les études nombreuses qui ont été faites dans ce laboratoire, nous croyons ne pas sortir de notre sujet en jetant un coup d'œil sur les établissements similaires de quelques pays étrangers (¹).

Quelle que soit l'opinion qu'on peut avoir sur les mérites de l'initiative privée, en fait d'organisation des bureaux d'essais, il est admissible que leur fonctionnement peut légitimement relever du contrôle des pouvoirs publics. Outre les grandes dépenses que leur installation exige, ces laboratoires peuvent rendre de très grands services dans le cas litigieux qui se produisent si souvent dans tout pays à grande industrie métallurgique. Mais outre le point de vue purement utilitaire, on peut envisager l'existence de ces laboratoires également au point de vue des recherches scientifiques désintéressées et pour lesquelles les ressources d'une organisation privée sont souvent insuffisantes.

C'est ainsi que, dans beaucoup de pays, on a créé des laboratoires d'essais pour la Marine, l'Artillerie, les chemins de fer et à côté on a fondé de véritables « Instituts » d'expériences, rattachées soit aux écoles techniques supérieures soit jouissant d'une organisation entièrement indépendante.

En Angleterre il existe un grand nombre de ces laboratoires d'enseignement, tous subventionnés par des Universités, ou par des corporations commerciales et

1. Si dans ce qui va suivre il n'est question que des laboratoires d'essais relevant plus ou moins des institutions publiques, il convient cependant de citer en première ligne celui de M. David Kirkaldy, établi depuis 25 ans à Londres, et dont les travaux sont trop favorablement connus pour que nous ayons besoin d'en vanter l'organisation. Dans le même ordre d'idées nous mentionnerons le laboratoire fondé par M. Thomasset à Paris.

industrielles⁽¹⁾. En Suisse, on peut citer le laboratoire d'essais fédéral près l'école polytechnique de Zurich. Un laboratoire d'enseignement se trouve également installé à l'Ecole des voies et communications de Saint-Pétersbourg.

Quant aux laboratoires allemands, on peut citer le laboratoire de l'Etat à Charlottenbourg, ainsi que les laboratoires des Ecoles polytechniques de Munich, Dresde, Stuttgart etc. L'Autriche possède des laboratoires d'essais rattachés aux Ecoles techniques supérieures de Vienne et de Prague, ainsi qu'un laboratoire organisé par le Musée technologique des Arts et Métiers de Vienne. Bien que dû à l'initiative privée, ce laboratoire n'en est pas moins placé sous le contrôle de l'Etat, et le Ministère de la Guerre y fait exécuter d'importants travaux ; la Belgique possède dans son établissement de Malines un laboratoire bien outillé.

Enfin, aux Etats-Unis, on a fondé, il y a quelques années, dans l'arsenal de l'Artillerie de Watertown, un laboratoire d'essais dont le règlement a été élaboré, pour le cas d'essais exécutés pour l'industrie privée, par une Commission de la Société américaine des ingénieurs civils. Nous n'avons pas la prétention de vouloir épouser la liste de toutes les organisations similaires. Il nous suffit d'avoir montré combien on se préoccupe partout de placer les essais de matériaux de construction, sinon sous le contrôle complet de l'Etat, tout au moins entre les mains d'hommes aussi compétents que désintéressés dans toutes les questions d'ordre commercial^(*).

1. Voir A. B. W. Kennedy. *The Use and Equipment of Engineering Laboratories* (*Proceed. of the Inst. of Civil Engineers*. Vol. 88, 2^e partie 1887).

2. Sur l'organisation des laboratoires d'essais placés sous le contrôle de l'Etat, voir l'intéressant opuscule de M. von Pichler, *Die Materialprüfungs-Maschinen der Pariser Weltausstellung im Jahre 1878*. Leipzig 1879, pp. 2 et 3.

TABLE DES MATIÈRES

Contenues dans le Troisième volume

DES

TRAVAUX DU CONGRÈS INTERNATIONAL DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE

	Pages
Note sur une méthode n'exigeant pas la mesure de petites dimensions pour la détermination du coefficient d'élasticité et de la limite des allongements permanents des corps métalliques, par Ed. Phillips	1
De l'emploi des modèles pour déterminer expérimentalement les conditions de résistance des solides élastiques, par Ed. Phillips	5
Note sur le frottement des cuirs emboutis et la mesure exacte des hautes pressions. — Machines d'essai des matériaux sans bascule, p. Georges Marié Progrès réalisés par les Associations des propriétaires d'appareils à vapeur, Conférence de M. Bour	9
Les chaudières à petits éléments à l'Exposition Universelle de 1889. Conférence de M. Olry	19
Aperçu d'une étude sur le rendement des chaudières à vapeur, p. A. Huet .	45
Notice historique sur l'épreuve des chaudières à vapeur, par M. A. Huet.	73
Chaudière de locomotive Webb à foyer ondulé rectangulaire	77
Chaudière de locomotive Webb à foyer d'acier ondulé cylindrique	85
Chaudière à vapeur, système Rocour	86
Chaudière multitubulaire à circulation, système de Dion, Bouton et Trépardoux	89
Note sur l'utilisation des mauvais combustibles, foyers à combustion méthodique, chargement mécanique du combustible, p. M. G. Alexis Godillot.	95
Générateur à production de vapeur instantanée (système Serpollet), par M. G. Lesourd	101
Chaudière à circulation d'eau, système A. Lagrafel et J. d'Allest	115
Note sur l'emploi de l'eau de mer comme supplément dans les chaudières marines alimentant des machines à triple expansion, par M. D. Stapfer	121
DEUXIÈME QUESTION. — Etude sur les essais des fers et des aciers. Rapport de M. E. Cornut.	127
Introduction	133

Cahiers des charges de la Marine française :	
Tôles de fer. — Epreuves à chaud	134
Tôles de fer. — Epreuves à froid	136
Tôles d'acier.— Epreuves à froid	138
Tôles d'acier. — Epreuves à chaud	140
Tôles d'acier.— Essais de trempe	141
Essais de la Marine Royale anglaise	141
Cahiers des charges de la Compagnie des Chemins de fer de l'Est	144
Cahiers des charges de la Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest	166
Cahiers des charges de la Compagnie des Chemins de fer du Nord	169
Cahiers des charges de la Compagnie des Chemins de fer de Paris-Lyon-Méditerranée	173
Cahiers des charges de la Compagnie des Chemins de fer de Paris à Orléans	174
Cahiers des charges de la Compagnie des Chemins de fer de l'Etat	176
Cahiers des charges de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur du Nord de la France	178
Résumé	179
ESSAIS A LA TRACTION.	181
Influence du mode de préparation des barreaux	181
Influence du cisailage et du poinçonnage	182
Expériences de M. Barba. — de M. Joëssel — de M. Gallon.	183
Influence de l'étirage à chaud au marteau ou au laminoir sur le métal	189
Opinion du Dr Percy.— Expérience de M. Clay.— De M. Le Basteur	189
Influence du laminage et du martelage à froid.	192
Expériences de Fairbairn.— De M. Barba.	192
Influence de la chaleur.	193
Essais de M. Kollmann.— De M. Adamson. — De M. Joëssel. — de M. André Le Chatelier. — De M. Reinau	194
Influence des tractions réitérées	201
Expériences de M. Henri Tresca	201
<i>But des essais à la Traction.</i>	202
<i>Résistance des métaux.</i>	204
Différence entre la charge maxima de résistance et la charge de rupture	205
Expériences de M. Adamson. — De M. Montgolfier. — Du Génie maritime	205
Erreur commise en rapportant la charge maxima de résistance en kilogrammes par millimètre carré de la section primitive	207
Expériences de M. E. Cornut.— De M. Considère. — Conclusion . .	207
<i>Ductilité.</i>	210
<i>De la Striction.</i>	211
Influence de la variation simultanée des dimensions transversales et de la longueur.	214
Influence de la longueur de l'éprouvette.	215
Influence de la section de l'éprouvette	216
Influence de la forme de la section	217

<i>Examen des différentes causes qui peuvent faire varier les résultats des essais à la traction</i>	217
Influence des têtes des éprouvettes	217
Essais de M. Barba	217
Comparaison après rupture des diverses sections d'une même éprouvette. — Essais de M. Marché.	218
Influence de la variation simultanée des sections transversales et de la longueur	220
Loi de similitude de M. Barba	220
Influence de la section transversale des barreaux d'épreuve	221
Expériences de la Staatsbahn. — De M. Kirkaldy.— De M. Barba.	221
Influence de la longueur des éprouvettes	223
Expériences de M. Fairbairn.— De M. Joëssel.— De M. Bauschinger — De M. Le Basteur.— De M. Kirkaldy.— De M. Ferd, Gautier.	223
De M. Marché.— De M. E. Cornut	234
Nécessité de fixer une longueur commune d'éprouvette	234
Influence des formes générales de l'éprouvette.	235
Essais de M. Reed. — De M. Kirkaldy. — De M. Joëssel. — De M. Barba	235
Influence de la durée de l'essai sur la résistance et l'allongement à la rupture	238
Expériences de Vicat — Thurston — de la Marine — de MM. Kirkaldy — Barba — Joëssel — Bauschinger	239
Influence de la forme de la section transversale des barreaux d'épreuve	242
Expériences de la Staatsbahn — de M. Adamson.— De M. Barba	242
TÉNACITÉ	244
Fragilité ou résistance aux chocs	245
Expériences de M. Le Basteur	246
Epreuves aux chocs par les matières explosibles	248
Essais de M. Adamson	248
<i>Essais aux chocs des aciers</i>	249
Service de l'artillerie de marine	249
Comptoir des forges suédoises	253
Expériences du général Uchatius	255
Observations sur les essais aux chocs	255
<i>Essais sur la dureté des métaux</i>	256
Essais du colonel Rossset — de M. Smith	257
ELASTICITÉ.	258
Charge limite d'élasticité.	259
Idées nouvelles sur l'élasticité. — Travaux de M. Wertheim — de M. Eaton Hodgkinson — de M. Victor Deshayes — de M. Considère	260
Travaux de M. Bauschinger	262
Recherches du coefficient d'élasticité.	266

<i>Expériences sur le mode de travail des métaux soumis d'une façon continue à des charges constantes supérieures à la charge limite de l'élasticité mais inférieures à la charge de rupture.</i>	266
Expériences de M. Vicat — de M. Thurston	266
<i>Expériences sur le mode de travail du métal soumis à des efforts répétés dans le même sens ou en sens inverse un grand nombre de fois sous forme de tractions, flexions ou torsions</i>	267
Expériences de Wöhler	267
<i>Essais à la compression, à la flexion, à la torsion</i>	267
CONCLUSIONS ET VŒU.	268
<i>Laboratoires de mécanique appliquée. — Vœu</i>	272
<i>Sur l'unification des méthodes d'essais des matériaux de construction, par M. Svilokossitch.</i>	277