

ANNALES
DES
PONTS ET CHAUSSÉES

MÉMOIRES ET DOCUMENTS

6^o SÉRIE

TOME IX

1885

1^{er} SEMESTRE

Ponts et Chaussées 1
Annales des ponts et 9
1885



408543

PARIS. TYPOGRAPHIE J. LECLERC

14, RUE DELAMBRE, 14

ANNALES
DES
PONTS ET CHAUSSÉES.

MÉMOIRES ET DOCUMENTS

RELATIFS

A L'ART DES CONSTRUCTIONS

ET AU SERVICE DE L'INGÉNIEUR;

LOIS, DÉCRETS, ARRÊTÉS ET AUTRES ACTES

CONCERNANT

L'ADMINISTRATION DES PONTS ET CHAUSSÉES.

MÉMOIRES ET DOCUMENTS

6^o SÉRIE

TOME IX

1885

1^{er} SEMESTRE

PARIS

V^{ve} CH. DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
ET DES TÉLÉGRAPHES

Quai des Augustins, n^o 49.

N° 34

MÉMOIRE

SUR

L'EMPLOI DU FER ET DE L'ACIER
DANS LES CONSTRUCTIONSPar M. CONSIDÈRE, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Ayant eu pendant plusieurs années l'occasion d'étudier de près les diverses espèces de fer et d'acier que peut produire la métallurgie moderne, nous avons pensé qu'il serait utile de publier une étude à ce sujet, au moment où des progrès nouvellement réalisés permettent de fabriquer l'acier à des prix si bas que son emploi s'impose dans les grandes constructions.

Nous avons fait de nombreuses expériences pour chercher à combler en partie les lacunes que présentent les connaissances définitivement acquises, et nous en donnons la description avec des détails parfois minutieux, mais qui sont nécessaires pour permettre à d'autres d'en discuter les résultats et d'en tirer, s'il y a lieu, des conclusions différentes de celles qui nous ont paru en découler.

Partout où nous avons, non à faire connaître des opinions ou des faits généralement admis, mais à développer des idées nouvelles, nous avons sacrifié la rapidité de

l'exposition à la rigueur des démonstrations, afin de rendre la preuve plus solide.

Pour prévenir le lecteur lorsqu'il est en présence de déductions qui n'ont d'autre autorité que celle qui leur est propre, nous leur avons donné constamment la forme personnelle, malgré ce qu'elle a de désagréable à la longue.

Notre travail est divisé en trois parties. La première, que nous publions actuellement, traite des propriétés communes au fer et à l'acier et des influences physiques et chimiques qui peuvent les modifier. La seconde contiendra l'étude des chocs, et la troisième celle des assemblages, des propriétés spéciales de l'acier, et enfin la détermination des efforts qu'il convient d'imposer au fer et à l'acier, en tenant compte des importantes expériences qui ont été faites par MM. Woehler et Spangenberg.

CHAPITRE I^{er}.

DIFFÉRENCES CARACTÉRISTIQUES DES PROCÉDÉS DE FABRICATION DU FER ET DE L'ACIER.

1. *Puddlage*. — L'affinage, par lequel on obtenait autrefois le fer, a maintenant des applications si peu importantes qu'il est inutile d'en parler.

Le puddlage, qui l'a remplacé, est une opération fort simple en théorie. La fonte, formée de fer, de carbone et de silicium, accompagnés d'impuretés en quantité variable, est fondue dans un four à reverbère sur une sole à base d'oxyde de fer; elle est agitée à force de bras ou mécaniquement, de telle sorte que tous ses éléments arrivent successivement au contact d'une flamme oxydante, ou au moins d'une scorie oxydée et basique qui recouvre la surface du bain. Le silicium et le carbone sont successivement oxydés; le premier forme de la silice, qui passe dans

la scorie ; le second s'échappe à l'état d'oxyde de carbone. Les impuretés, telles que le phosphore, le soufre et l'arsenic, sont en partie oxydées et passent aussi dans la scorie.

Par suite du départ successif de ces divers éléments, le fer métallique prend naissance et, comme la température du four est insuffisante pour le fondre, il forme des particules pâteuses noyées dans la scorie. Le puddleur les réunit en masses spongieuses qui sont portées aux appareils de cinglage, puis laminées en barres, afin d'éliminer autant que possible la scorie interposée entre les particules de fer, de rapprocher ces dernières, de les souder et d'en former un corps solide.

Quelque soin que l'on apporte aux diverses opérations du puddlage, les particules de fer retiennent une petite proportion de la scorie dans laquelle elles ont été baignées. En passant au laminoir, les grains de fer s'allongent, se soudent plus intimement ; mais le métal conserve néanmoins la constitution fibreuse ou lamelleuse, qui est la conséquence de son origine et la cause de ses propriétés caractéristiques.

Toutefois cette structure spéciale n'apparaît pas toujours au simple aspect de la cassure. Le puddleur peut en effet produire à volonté soit du fer à nerf, où cette constitution est très marquée, soit du fer à grain, où on ne peut la faire apparaître que par l'attaque à l'eau acidulée. On favorise la formation du grain en réunissant toutes les circonstances qui facilitent l'expulsion de la scorie, c'est-à-dire en la rendant fluide par la température élevée du four et par la prédominance des bases alcalines ou du manganèse. Le nerf tend au contraire à prendre naissance lorsque le four à puddler a une température peu élevée et lorsque la scorie est rendue pâteuse par la présence de l'alumine, de la chaux ou encore par l'insuffisance ou l'excès de la dose de silice. Dans ces conditions, elle est expulsée incom-

plètement par le cinglage et le laminage, et forme dans le fer des lamelles qui donnent à la cassure un reflet grisâtre et un mauvais aspect.

La proportion de scorie n'est pas la seule cause qui influe sur la structure du fer ; plus le métal est décarburé, plus il a de tendance à prendre du nerf, et on peut même, en poussant assez loin l'oxydation du carbone, obtenir du fer à nerf renfermant très peu de scories. Mais le métal ainsi obtenu est d'une toute autre qualité que le fer commun. Sa cassure présente un nerf allongé, argenté et brillant, qui est l'indice certain d'une qualité supérieure. Au contraire, plus le métal renferme de carbone, plus il devient grenu, cristallin, et se rapproche des aciers par son apparence comme par ses propriétés. On produit même par le puddlage de véritables aciers prenant la trempe et acquérant une grande dureté, et on donne à ces produits le nom d'acier naturel ou d'acier puddlé.

Mais, quelle que soit l'apparence de leur cassure, les produits dérivés du puddlage renferment des scories en fibres ou en lames, que l'attaque par l'eau acidulée met en évidence et qui sont la cause des propriétés spéciales qui les distinguent des métaux obtenus par fusion complète.

2. *Fabrication de l'acier.* — L'acier fondu a une toute autre origine que le fer. Qu'il soit produit par le mélange de la fonte, du fer et quelquefois du minerai comme dans le procédé Martin-Siémens, ou par la combustion des corps étrangers, résultant du passage de l'air à travers le bain de fonte comme dans le procédé Bessemer, l'acier prend naissance à une température assez élevée pour rester parfaitement liquide. En vertu de sa moindre densité, la scorie se sépare presque complètement du métal, qui, par le refroidissement, se solidifie en une masse appelée lingot. Sauf les soufflures qu'il renferme, le lingot peut être considéré en pratique comme homogène, et à plus forte raison peut-

on regarder comme tels les produits que l'on obtient en le forgeant ou en le laminant.

De là dérive pour l'acier une constitution physique absolument différente de celle du fer. Au lieu de fibres allongées dans le sens du laminage et comprenant entre elles des lamelles de scories, il présente une pâte homogène, dont les propriétés sont pratiquement identiques, quel que soit le sens que l'on considère et qui ne peut donner naissance que très exceptionnellement à ces déssoudures longitudinales que l'on observe souvent dans le fer.

Si la structure de l'acier a de grands avantages, elle présente en revanche deux inconvénients. Elle semble moins favorable à la soudabilité, et, en tous cas, elle oppose moins de résistance que la structure fibreuse du fer à la propagation des fissures transversales. Un défaut local, une fente, si petite qu'elle soit, devient pour l'acier, bien plus facilement que pour le fer, le point de départ d'une rupture transversale.

Il est donc d'une importance spéciale, lorsqu'on emploie l'acier, d'éviter tout commencement de fissure et même tout changement brusque de section ; et les variations inévitables de profil doivent toujours être rachetées par des congés ou raccordements courbes. Nous reviendrons sur ce sujet.

Il convient du reste de remarquer que l'acier Bessemer présente les caractères spéciaux que nous signalons à un degré un peu plus marqué que l'acier Martin. Cela tient sans doute à ce qu'il est produit à une température plus élevée, qui permet une séparation plus parfaite de la scorie et qui produit une structure encore plus homogène.

3. *Définition du fer et de l'acier.* — On a beaucoup discuté et beaucoup écrit sur la définition du fer et de l'acier, et on ne peut nier que cette question présente un grand intérêt au point de vue des tarifs de douane. Ce

côté de la question étant absolument étranger à notre étude, nous nous bornerons à faire connaître les désignations courantes.

Le puddlage et la fusion peuvent à volonté produire du fer ou de l'acier, mais en leur donnant des structures et des propriétés différentes ; il importe donc de savoir, non seulement quelle est la dureté du métal auquel on a affaire, mais aussi quelle est son origine.

On appelle en conséquence *fer puddlé*, le métal obtenu par le puddlage, qui ne reçoit pas de la trempe une augmentation de dureté appréciable à la lime, et *acier puddlé*, le métal de même origine qui prend une trempe sensible.

On désigne par le nom de *fer fondu* (en allemand Flusseisen) le métal produit par fusion et ne trempant pas sensiblement et par celui *d'acier fondu* le métal fondu prenant bien la trempe.

Le puddlage servant surtout à produire le métal doux et la fusion ayant jusqu'à présent été utilisée principalement à fabriquer le métal dur, le mot *fer*, sans qualificatif, désigne toujours le fer puddlé et le mot *acier*, employé seul, désigne l'acier produit par fusion.

CHAPITRE II.

ÉTUDE DE LA TRACTION SIMPLE.

Les métaux peuvent travailler par traction, compression, cisaillement, flexion ou torsion.

Nous nous occuperons d'abord de la traction qui a été l'objet d'un nombre considérable d'expériences.

4. *Forme des barrettes d'essai.* — Dans les essais de traction on s'applique surtout à mesurer deux sortes d'élé-

ments : les tensions qui donnent la mesure de la *tenacité* du métal et les allongements qui permettent d'apprécier sa *ductilité*.

Les barreaux que l'on soumet aux essais ont toujours une partie cylindrique, et on a reconnu que sa longueur n'exerce pas d'influence appréciable sur la résistance à la rupture, par millimètre carré, pourvu qu'elle dépasse 2 à 3 centimètres. La forme de la section du barreau semble influencer sur la résistance, mais si faiblement qu'on peut n'en pas tenir compte dans la pratique.

Au contraire, la longueur et la section de la partie cylindrique du barreau exercent une influence considérable sur l'allongement avant rupture, par suite du phénomène qui a reçu le nom de striction.

Lorsque l'effort auquel est soumis le métal atteint la charge de rupture, on voit un étranglement se dessiner en un point du barreau et augmenter jusqu'à ce que le métal se brise dans sa section la plus contractée.

Dans la partie où s'est produite cette striction, le métal s'est beaucoup plus allongé que dans le surplus du barreau, qui est resté sensiblement cylindrique.

L'allongement total se compose donc de deux fractions, l'une proportionnelle à la longueur de la partie cylindrique, l'autre constante, quelle que soit cette longueur, et dépendant uniquement de la forme et de l'intensité de la striction.

Les dimensions de la section de la barrette ont également de l'influence sur l'allongement, la striction ayant d'autant plus de longueur et par suite d'importance au point de vue de l'allongement total que la barre est plus grosse.

L'allongement pour 100 augmente donc avec la section du barreau et diminue au contraire lorsque sa longueur s'accroît, et il est reconnu (*) que, pour que ces deux effets

(*) Communication de M. Barba à la société des Ingénieurs civils, juin 1880.

se compensent et rendent les résultats comparables, il faut que les éprouvettes soient semblables entre elles, c'est-à-dire que l'écartement des repères, entre lesquels on mesure l'allongement, soit proportionnel aux côtés de la section du barreau et que ces côtés soient proportionnels entre eux.

Pour obtenir des résultats comparables, avec des tôles ou barres d'épaisseurs différentes, on devrait donc donner à la largeur et à la longueur des barreaux des valeurs proportionnelles aux épaisseurs des feuilles dans lesquelles elles sont découpées. Mais on arriverait ainsi à avoir un nombre illimité de modèles de barreaux, et il en résulterait une complication telle, que tous les services de contrôle ont renoncé à avoir des résultats comparables pour les tôles d'épaisseurs différentes et ont adopté un petit nombre de types de barreaux d'essai, sauf à exiger des allongements d'autant moindres que l'épaisseur des éprouvettes est plus faible.

La marine française, par exemple, admet qu'un même acier essayé en tôles

de	7 mil. et plus,	6 à 5,	5 à 4,	4 à 3,	3 à 2,	2 à 1 1/2 mil.,	devra
donner	20	18	16	14	12	10 p.	100

d'allongement.

Elle admet aussi que l'épaisseur des tôles influe en sens inverse sur la résistance, mais ce n'est plus une question du même ordre, la supériorité de résistance des tôles minces résultant, non de la forme des barreaux d'essai, mais du corroyage plus énergique que ces tôles subissent pendant leur fabrication.

Les faits que nous venons d'indiquer établissent que, si on veut mesurer les allongements entre repères, il est nécessaire d'adopter des formes de barreaux bien déterminées, pour avoir des résultats qui puissent être comparés et discutés avec fruit. Dans tous nos essais (sauf indication contraire), nous avons adopté les types de la marine fran-

çaise, c'est-à-dire, pour les barreaux plats provenant de tôles ou de barres :

Longueur de la partie cylindrique, entre repères, 200 millimètres ;

Épaisseur égale à celle de la tôle ;

Largeur égale à l'épaisseur, lorsque celle-ci dépasse 18 millimètres ;

Largeur égale à 30 millimètres pour les tôles de 18 à 5 millimètres d'épaisseur ;

Largeur égale à 20 millimètres pour les tôles ayant moins de 5 millimètres d'épaisseur.

Pour les barreaux tournés :

Longueur de la partie cylindrique entre repères, 200 millimètres ;

Diamètre égal à 16 millimètres.

Quant à la forme générale des barreaux, elle est représentée par la figure 6 (*) pour les tôles, et par la figure 7 pour les barreaux tournés.

Dans le premier type à section rectangulaire, des broches d'acier de 30 millimètres de diamètre sont engagées dans les trous des têtes, et c'est sur elles que s'exerce la traction de la machine.

Dans le second type, les têtes présentent des saillies qui

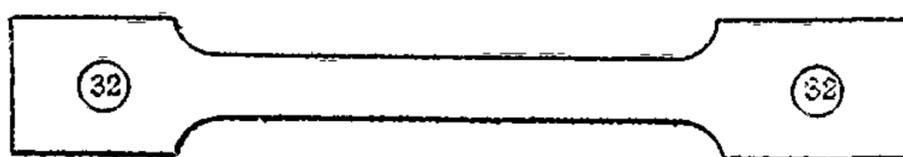


Fig. 6.

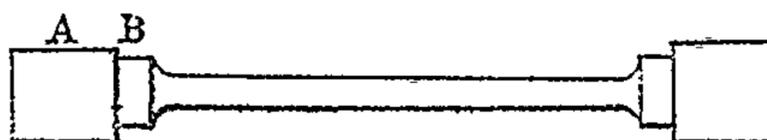


Fig. 7.

(*) Les cinq premières figures sont placées hors texte. Planche 14.

servent de points d'attache aux mordaches, dans lesquelles elles sont saisies.

Nous ne donnerons pas de détails sur la forme de ces mordaches, non plus que sur les machines d'essai, parce que leurs dispositions sont très variées et ont été décrites avec beaucoup de soin dans divers ouvrages et notamment dans celui qui a été publié par M. Lebasteur à l'occasion de l'Exposition universelle de 1878 (*).

Nous allons en conséquence résumer immédiatement les faits que les essais de traction ont mis en lumière.

5. *Allongement du métal.* — Lorsqu'on soumet un barreau cylindrique de fer ou d'acier à un effort de traction dirigé suivant son axe, on observe qu'il s'allonge d'une certaine quantité qu'on appelle *allongement total*.

Si on supprime ensuite l'effort, le barreau se raccourcit, mais sans revenir absolument à sa longueur primitive. On appelle *allongement élastique* la partie de l'allongement total qui disparaît en même temps que l'effort et *allongement permanent* la partie de l'allongement total qui persiste après la suppression de l'effort.

L'*allongement élastique* du fer et de l'acier est très sensiblement proportionnel à l'effort, et sa valeur est toujours comprise (**) pour le fer entre $0^m,000048$ et $0^m,000052$, et pour l'acier entre $0^m,000044$ et $0^m,000048$ par mètre et par kilogramme de traction rapportée au millimètre carré de section du barreau, quelle que soit la valeur de la traction et quels que soient aussi le degré de dureté et la qualité du fer ou de l'acier essayé.

6. *Coefficient d'élasticité.* — On appelle *coefficient* ou *module d'élasticité* l'effort qui serait nécessaire pour

(*) *Les métaux à l'Exposition universelle de 1878.* — Dunod.

(**) Ces chiffres généralement admis sont confirmés par des essais de flexion que nous avons récemment exécutés.

allonger d'un mètre une barre de métal ayant un mètre de longueur et un mètre carré de section, si l'élasticité parfaite persistait jusqu'à une pareille tension. Sa valeur moyenne est donc pour le fer :

$$E = \frac{1\,000^2}{0,000\,050} = 20 \times 10^9$$

et pour l'acier :

$$E = \frac{1\,000^2}{0,000\,046} = 22 \times 10^9.$$

L'*allongement permanent* n'est pas soumis à une loi simple comme celle qui régit l'allongement élastique. Presque imperceptible pour les efforts très faibles, il augmente peu à peu avec une rapidité croissante, et, de très inférieur qu'il était à l'allongement élastique, il lui devient bientôt égal, puis supérieur.

Il peut alors être constaté avec les instruments les plus grossiers.

7. *Limite d'élasticité.* — C'est cette apparition presque subite d'un allongement notable qu'on a observée depuis longtemps et on a donné le nom de *limite d'élasticité* à la tension par millimètre carré qui la produit.

Comme nous venons de le dire, l'élasticité n'est pas parfaite jusqu'à cette limite, puisque des charges bien inférieures produisent des allongements permanents ; néanmoins on a conservé avec raison la notion de la limite d'élasticité, en la définissant, non plus comme la tension à partir de laquelle le métal perd son élasticité parfaite, mais comme la tension à partir de laquelle les déformations permanentes ont une valeur mesurable sans instruments de précision.

C'est à tort, suivant nous, que certains expérimentateurs ont admis comme limite d'élasticité la plus faible tension pour laquelle ils constataient des allongements permanents

avec des instruments de précision, car dans ces conditions, sa valeur varie avec les observateurs et avec la perfection des instruments employés. C'est ainsi qu'on a parfois assigné au fer ordinaire des limites d'élasticité de 13 kilogrammes, 12 kilogrammes et même de 10 kilogrammes, tandis que la limite d'élasticité, définie comme nous le faisons, d'accord avec les métallurgistes et les constructeurs, varie pour le fer entre 15 et 20 kilogrammes, sauf de rares exceptions.

Pour rendre absolument comparables dans tous les cas les résultats obtenus par divers expérimentateurs, il conviendrait toutefois de préciser davantage la définition, par exemple de fixer comme limite d'élasticité la tension pour laquelle l'allongement total est le double de l'allongement élastique calculé.

Cette définition serait surtout utile pour les métaux dont l'allongement augmente d'une manière bien continue avec la tension et qui ne présentent pas de changement brusque d'allongement dans le voisinage de la limite d'élasticité. Le plus souvent il n'en est pas ainsi, et l'allongement prend tout à coup un accroissement notable qui ne laisse aucun doute sur la valeur à assigner à la limite d'élasticité. On en verra des exemples dans les courbes de déformation des figures 3 et 4 dont nous parlerons plus loin.

8. *Striction.* — Lorsque la limite d'élasticité est dépassée, la déformation augmente de plus en plus rapidement. La partie cylindrique du barreau continue d'abord à s'allonger régulièrement, en diminuant à peu près uniformément de section dans toute sa longueur. Puis il arrive un moment où il se dessine en un point du barreau un étranglement, qui s'accroît jusqu'à ce que la rupture se produise dans la section la plus réduite, comme nous l'avons déjà dit à propos de la forme à donner aux barreaux d'essai. C'est ce qu'on appelle la *striction*.

Nous désignerons par σ la section primitive du barreau, par S sa section en dehors de la striction et par S' sa section dans la striction.

Certains expérimentateurs prennent comme mesure de la striction $\frac{S'}{\sigma}$, rapport de la section contractée S' à la section primitive σ ; d'autres mesurent la *contraction* elle-même $C = \frac{\sigma - S'}{\sigma}$; $\frac{S'}{\sigma}$ est d'autant plus petit, et $\frac{\sigma - S'}{\sigma}$ au contraire d'autant plus grand que la striction est plus forte.

9. *Résistance à la rupture.* — On appelle charge de rupture ou *résistance à la rupture*, R , l'effort qui a brisé le barreau, rapporté au millimètre carré de sa section primitive, et *allongement de rupture*, l'allongement total et permanent qu'a pris le barreau entre ses deux repères au moment de se rompre, rapporté à l'unité de longueur.

10. *Théorie de la rupture.* — La résistance à la rupture ainsi définie répond aux besoins de la pratique, car, lorsqu'on a à calculer la dimension d'une barre de métal, c'est de la section primitive qu'on dispose, et c'est l'effort qu'elle peut supporter qu'il importe de connaître.

Toutefois, si on analyse le phénomène de la déformation, on reconnaît que cette définition de la résistance à la rupture est une abstraction, et que la section du barreau, étant considérablement réduite au moment de la rupture, supporte en réalité une tension par millimètre carré bien supérieure à la résistance ainsi calculée.

D'autre part, l'allongement total que prend le barreau



Fig. 8.

entre ses deux repères A et B (fig. 8) se compose de deux parties. A l'allongement régulier qu'a pris le barreau dans les parties A'C' et D'B' qui sont restées cylindriques, s'ajoute l'étirage de la partie contractée C'D', et l'importance relative de cet étirage est d'autant plus faible que la longueur totale comprise entre les repères A et B est plus grande. Il est clair que, si ces repères étaient très éloignés l'un de l'autre, l'allongement pour 100 total ne serait pas sensiblement influencé par la striction et serait égal à l'allongement régulier des parties restées cylindriques. Si au contraire les repères ne comprenaient entre eux que la partie déformée par la striction, l'allongement pour 100 ne dépendrait que de la striction elle-même.

L'allongement mesuré entre deux repères est donc la résultante complexe de deux éléments disparates, intervenant dans des proportions variables, qui ne correspond à aucune notion précise. Il faut l'écarter de toute analyse scientifique et l'y remplacer par les notions simples dont elle dérive, alors même qu'elle pourrait avoir quelque utilité dans la pratique. C'est ce que nous ferons désormais.

11. Nous venons de décrire les faits qui précèdent la rupture, tels qu'on les observe avec les machines d'essai à levier. Si on emploie une machine d'essai, dans laquelle la tension de la barre soit indiquée à chaque instant par un manomètre, on est conduit à introduire un nouvel élément dans cette étude. On remarque en effet que, si l'effort total que supporte le barreau augmente réellement en même temps que son allongement, tant que la tige reste cylindrique, il atteint un maximum au moment où la striction commence à apparaître et diminue ensuite graduellement, à mesure que la striction augmente, jusqu'à ce que la rupture se produise enfin sous un effort total bien inférieur au maximum.

Nous donnons ci-dessous les résultats de deux essais, que M. de Montgolfier, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, directeur de la Société des aciéries de la marine et des chemins de fer, a bien voulu faire exécuter sur un barreau de fer et sur un barreau d'acier extra-doux.

Les barreaux soumis à la traction avaient une section circulaire de 16 millimètres de diamètre, et la distance entre les repères était de 200 millimètres.

Barreau en fer fin très doux.

Diamètre primitif 16 millimètres. — Section primitive 201 millimètres carrés. — Distance entre les repères 200 millimètres.

EFFORTS totaux E 1	ALLONGEMENTS entre repères rapportés à un mètre de longueur. a 2	DIAMÈTRES de la striction D 3	SECTION minimum du barreau S ou S' 4	TENSION par millimètre carré de la section minimum T 5	ALLONGEMENT p. 100 dans la section minimum A 6	
k.	cm.		mm.	k.		
400	0,010 (1)		200,97	1,99	0,010	
800	0,020		200,95	3,93	0,020	
1200	0,030		200,93	5,97	0,030	
1600	0,040		200,91	7,96	0,040	
2000	0,050		200,89	9,95	0,050	
2400	0,060		200,87	11,94	0,060	
2800	0,075		200,84	13,94	0,075	
3200	0,090		200,81	15,93	0,090	
3600	0,110		200,77	17,93	0,110	
4000	3,800		193,64	20,64	3,800	Limite d'élasticité.
4400	4,800		191,79	22,91	4,800	
4800	6,250		189,17	25,37	6,250	
5200	8,250		185,68	28,00	8,250	
5600	11,120		180,88	30,95	11,120	
6000	16,600	mm.	172,38	34,80	16,600	Commencement de la striction.
6400	23,250	14,2	158,36	38,51	27,000	
5900	27,600	13,3	138,92	42,47	44,000	
5700	30,250	12,5	122,71	46,41	63,000	
5500	32,000	11,8	109,45	50,25	84,000	
5300	33,000	11,2	98,52	53,79	104,000	Rupture.

(1) La faible longueur entre repères du barreau n'a pas permis de mesurer rigoureusement les très petits allongements qui se sont produits au-dessous de la limite d'élasticité. Les 9 premiers nombres de la deuxième colonne de ce tableau et les 12 premiers du tableau suivant ne doivent donc pas être regardés comme très exacts.

Limite d'élasticité comprise entre 18 et 20 kilogrammes.

Résistance usuelle à la rupture rapportée au millimètre

$$\text{carré de section primitive } \frac{6100^k}{201} = 30^k,3$$

Allongement entre repères 33 p. 100.

Barreau en acier très doux.

amètre primitif 16 millimètres. — Section primitive 201 millimètres carré. — Distance entre repères 200 millimètres.

EFFORTS totaux E	ALLONGEMENTS entre repères rapportés à un mètre de longueur a	DIAMÈTRES de la striction D	SECTION minimum du barreau S ou S'	TENSION par millimètre carré de la section minimum T	ALLONGEMENT p. 100 dans la section minimum A	
1	2	3	4	5	6	
k.	cm.		mm.	k.		
400	0,010		200,97	1,99	0,010	
800	0,015		200,96	3,98	0,015	
1200	0,020		200,95	5,97	0,020	
1600	0,025		200,94	7,96	0,025	
2000	0,030		200,93	7,95	0,030	
2400	0,040		200,91	11,94	0,040	
2800	0,050		200,89	13,94	0,050	
3200	0,060		200,87	15,93	0,060	
3600	0,070		200,85	17,93	0,070	
4000	0,080		200,83	19,91	0,080	
4400	0,090		200,81	21,91	0,090	
4800	0,105		200,78	23,90	0,105	
5200	2,375		193,39	26,47	2,375	Limite d'élasticité.
5600	3,000		193,14	28,69	3,000	
6000	4,000		193,26	31,01	4,000	
6400	5,000		191,42	33,43	5,000	
6800	6,250		189,13	35,95	6,250	
7200	7,875		186,35	38,63	7,875	
7600	10,125		182,51	41,64	10,125	
8000	12,750	mm.	178,14	44,90	12,750	Commencement de la striction.
8100	15,625	14,1	156,14	51,87	29,000	
7900	17,625	13,1	134,78	58,65	50,000	
7700	19,625	12,5	122,71	62,74	62,000	
7500	21,625	11,8	109,39	68,56	81,000	
7300	23,125	11,4	99,71	73,21	101,000	
7100	23,875	11,2	98,52	72,08	104,000	
6900	24,625	11,0	95,03	72,60	111,000	
6700	25,375	10,8	91,60	73,14	119,000	
6500	25,875	10,7	89,92	72,26	123,000	
6300	26,125	10,6	88,24	71,41	128,000	
6200	26,250	10,5	86,55	71,63	132,000	Rupture.

Limite d'élasticité comprise entre 24 et 26 kilogrammes.

Résistance usuelle à rupture rapportée au millimètre carré de section primitive $\frac{8100^k}{201} = 40^k,30$.

Allongement entre repères 26,25 p. 100.

La première colonne de chaque tableau indique les efforts totaux E supportés successivement par les barreaux.

La seconde colonne donne les allongements totaux cor-

respondants α , rapportés à un mètre de longueur primitive, c'est-à-dire des chiffres quintuples des allongements totaux constatés entre les repères espacés de 200 millimètres.

Dans la troisième colonne sont inscrits les diamètres décroissants de la striction, mesurés au Palmer à partir du moment où elle a commencé à se produire.

Au moyen de ces éléments fournis directement par l'observation nous avons calculé pour chaque valeur de l'effort total :

1° La tension maximum du métal par millimètre carré de la section la plus fatiguée, c'est-à-dire de la section minimum ;

2° L'allongement maximum du métal dans la même section.

Pour obtenir le premier élément, il fallait d'abord déterminer les aires successives de la section la plus fatiguée. Tant qu'il n'y a pas striction, la section S de la barre est à peu près uniforme, et la conservation de la densité du métal qui ne varie jamais de plus de $\frac{7}{100\,000}$ (*) permet d'établir avec une exactitude suffisante (**) la relation $S(1 + \alpha) = 201$, la section primitive σ du barreau étant égale à 201 millimètres carrés.

On a en conséquence calculé par la formule $S = \frac{201}{1 + \alpha}$ les valeurs successives que prend la section de la barre avant l'apparition de la striction et on les a inscrites dans la quatrième colonne.

Une fois la striction prononcée, les sections minima S'

(*) Communication de M. Barba à la société des Ingénieurs civils, juin 1880.

(**) L'exactitude de ce calcul serait absolue pour des barreaux de très grande longueur, mais dans les barreaux courts le voisinage des têtes empêche le diamètre de rester absolument uniforme même avant la striction. Les légères erreurs qui en résultent pour les premiers chiffres des colonnes quatre et cinq n'ont aucune importance et n'influeront pas sur nos conclusions.

du barreau ont été calculées directement au moyen de leurs diamètres observés, qui sont consignés dans la troisième colonne. Elles ont servi à compléter la quatrième colonne.

Les tensions T du métal par millimètre carré de la section la plus fatiguée sont donc égales à $\frac{E}{S}$ avant, et à $\frac{E}{S'}$, après l'apparition de la striction. Elles sont inscrites dans la cinquième colonne.

Les allongements A du métal dans la section la plus fatiguée, sont sensiblement égaux aux allongements totaux observés, tant que le barreau se déforme à peu près uniformément dans toute la longueur comprise entre les repères. Nous avons donc reproduit dans la sixième colonne les chiffres de la deuxième jusqu'à l'apparition de la striction.

Une fois la striction commencée, il devient impossible de mesurer directement l'allongement du métal dans la partie contractée, dont la longueur est trop faible ; mais il est facile de le déduire de l'aire de la section minimum, en se basant une seconde fois sur le principe de la conservation de la densité du métal, qui donne la relation $S'(1 + A) = 201$ millimètres, d'où :

$$A = \frac{201}{S'} - 1.$$

Les valeurs de l'allongement du métal pendant la striction ont été calculées par cette formule et ont servi à compléter la sixième colonne.

On a donc ainsi dans la cinquième et la sixième colonne du tableau les valeurs correspondantes des tensions et des allongements du métal dans la section la plus fatiguée depuis le commencement de l'essai jusqu'à la rupture.

12. *Courbe de déformation réelle.* — Pour représenter graphiquement la relation qui existe entre ces deux éléments, on a pris les allongements A pour abscisses portées sur l'axe Ox et les tensions T pour ordonnées, et on a ainsi obtenu pour le fer la courbe représentée dans la figure 1 (*), et pour l'acier la courbe représentée par la figure 2. Nous allons étudier la première qui présente une continuité à peu près parfaite.

On remarquera d'abord, qu'à l'échelle adoptée, les allongements sont imperceptibles pour les tensions inférieures à la limite d'élasticité qui est comprise entre 18 et 20 kilogrammes. Au delà, la courbe s'écarte de l'axe Oy avec une rapidité croissante et la tangente s'éloigne de plus en plus de la verticale. En d'autres termes, à des augmentations égales de l'allongement du métal, correspondent des augmentations de la tension qui décroissent d'une manière constante jusqu'à la rupture. Il n'y a d'exception à cette loi que dans le voisinage de la limite d'élasticité.

Quant à la striction, son existence et son importance ressortent des valeurs successives des diamètres inscrits dans la troisième colonne, et font naître les questions suivantes :

Pourquoi la tige cylindrique soumise en tous ses points à un effort identique ne continue-t-elle pas jusqu'à la rupture à s'allonger régulièrement dans toutes ses parties ? Pourquoi, tandis que la plus grande partie du barreau cesse absolument de s'allonger, se forme-t-il en un point singulier un étranglement qui s'accroît de plus en plus, et dont la section diminue jusqu'à ce qu'elle ne soit plus que les deux tiers, la moitié et parfois le tiers de la section primitive ?

Nous n'avons entendu assigner à ce phénomène d'autre cause que le manque d'homogénéité des métaux qui, étant

(*) Les figures 1 et 2 sont placées hors texte, planche XIV.

essentiellement variable, ne saurait expliquer un fait constant. Nous croyons en conséquence qu'il faut chercher ailleurs et que les faits se passent comme nous allons l'exposer.

Ce qui est à noter d'abord c'est que, tant qu'il n'y a pas striction, l'effort total $E = TS$, que supporte le barreau, augmente avec son allongement. Il s'ensuit que la tension T augmente alors plus vite que la section S ne diminue. Le barreau est donc en équilibre stable, car, si, par suite d'un manque d'homogénéité, une de ses sections s'allonge plus que les autres, elle devient par là même capable d'un effort total plus considérable et cesse forcément de s'allonger, jusqu'à ce que toutes les autres parties du barreau soient devenues, par suite d'un égal allongement, capables du même effort total.

On comprend donc parfaitement ce premier point, qu'il n'y a et qu'il ne peut y avoir striction dans un métal sensiblement homogène, tant que la tension augmente avec l'allongement, plus vite que la section ne diminue. Le métal est pendant cette période en équilibre stable.

Au contraire, à un certain moment qui correspond au début de la striction, le barreau est en équilibre instable. L'expérience prouve que l'effort total atteint alors un maximum et décroît ensuite, ce qui signifie que, si le métal s'allonge davantage, la tension croît moins vite que la section ne diminue. Il en résulte que, si une section s'allonge plus que les autres, elle ne sera plus capable que d'une résistance inférieure à celle des sections voisines. L'équilibre sera donc rompu, l'inégalité s'accroîtra; la section amoindrie se contractera de plus en plus, l'effort total diminuera et deviendra insuffisant pour déformer le surplus du barreau, qui restera dans l'état correspondant au maximum de résistance totale.

En examinant les chiffres de la première colonne on reconnaîtra en effet que l'effort total a augmenté graduelle-

ment de zéro à 6 100 kilogrammes, qu'à ce moment la striction ayant commencé, il s'est abaissé graduellement de 6 100 kilogrammes à 5 300 kilogrammes, valeur correspondant à la rupture.

Si cette explication est exacte, la striction doit commencer, non pas à un moment quelconqué, variable au hasard avec l'homogénéité du métal, comme on l'admet généralement, mais au moment où TS atteint sa valeur maximum.

Or nous avons déjà vu qu'on a $S = \frac{210}{1+A}$ (*); donc la striction doit correspondre au maximum de $TS = \frac{201 T}{1+A}$ ou de $\frac{T}{1+A}$, c'est-à-dire au moment où on a :

$$(1+A) dT - T dA = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{dT}{dA} = \frac{T}{1+A},$$

$\frac{dT}{dA}$ est l'inclinaison de la tangente à la courbe de déformation que nous avons construite, et $\frac{T}{1+A}$ est l'inclinaison d'une ligne droite réunissant un point de cette courbe à un point pris sur l'axe Ox à gauche du point O et à une distance égale à l'unité.

L'équation $\frac{dT}{dA} = \frac{T}{1+A}$ signifie donc en langage analytique, que la striction doit se produire au point de la courbe de déformation dont la tangente coupe l'axe des x à une distance égale à l'unité à gauche de l'origine.

L'examen des figures 1 et 2 fait voir que cette déduction se vérifie exactement. Il ne pouvait du reste en être autrement, car elle est la conséquence analytique forcée du fait constaté par l'expérience que le maximum de l'effort total correspond au début de la striction.

(*) Tant que la striction n'est pas commencée α est égal à A et S égal à S' : cette formule est donc identique aux précédentes.

13. *Allongement proportionnel et allongement de striction.* — Dans la figure 1 nous avons tracé en regard de la courbe de déformation vraie ainsi obtenue et à la même échelle, la courbe de déformation conventionnelle OLMNR du même métal, telle qu'on la trace habituellement, en prenant pour abscisses les allongements moyens pour 100 mesurés entre les repères espacés de 200 millimètres et pour ordonnées les tensions par millimètre carré de section primitive, c'est-à-dire les quotients $\frac{E}{201}$. Pour nous conformer complètement à l'usage, nous avons indiqué la tension comme constante à partir du point où elle cesse d'augmenter, sans tenir compte des diminutions que révèlent les machines à manomètre et qu'on ne constate pas avec les machines à levier.

La comparaison de ces deux courbes montre les faits suivants : Presque confondues jusqu'à la limite d'élasticité qui est comprise entre 18 et 20 kilogrammes, elles s'écartent ensuite de plus en plus. La courbe conventionnelle donne les résultats ci-après :

Résistance usuelle à la rupture par millimètre carré de section primitive.. $R = 30^k,30$

Allongement moyen mesuré entre les repères.. $a = 33$ p. 100

La courbe vraie donne des chiffres bien différents :

Résistance à la rupture par millimètre carré de section contractée $R^s = 53^k,79$

Allongement correspondant dans la même section. $A = 104$ p. 100

Il résulte du mesurage des diamètres du barreau pendant l'essai, que la striction n'avait pas commencé à la quinzième observation et avait déjà une valeur très appréciable à la seizième. Son origine est donc comprise entre les ordonnées menées par les points M et N de la courbe conventionnelle, qui correspondent à ces deux observations et

le contact de la tangente DE la fixe au point P', dont l'abscisse donne 22 p. 100 pour valeur de l'allongement que le barreau avait pris uniformément dans toute sa longueur au moment où la striction a pris naissance.

Cet allongement de 22 p. 100 a persisté sans changement en dehors de la section contractée jusqu'à la rupture, on l'appelle *allongement proportionnel* de rupture. On arrive donc à reconnaître en somme que l'allongement entre repères de 33 p. 100 est la résultante d'un allongement proportionnel de 22 p. 100 existant en dehors de la striction et de l'allongement de striction, qui a atteint la valeur énorme de 104 p. 100 dans la section la plus contractée.

Pour l'acier, l'allongement de striction a atteint le chiffre plus considérable encore de 132 p. 100.

Nous allons étudier les conséquences de ces faits.

14. Que la résistance du métal atteigne 53^k,79 par millimètre carré dans la section de rupture, cela importe peu au point de vue du calcul des dimensions des barres travaillant par traction simple, puisque l'aire de cette section a diminué pendant la striction, plus que la résistance n'a augmenté. — Ce qui importe, c'est que l'effort maximum que le métal peut supporter est de 30^k,30 par millimètre carré de section primitive.

La détermination de la tension dans la section contractée n'a donc pas d'intérêt au point de vue du calcul des pièces travaillant par traction, mais elle montre que le métal peut prendre par les déformations mécaniques des résistances bien supérieures aux chiffres généralement admis, et prépare ainsi à comprendre les résultats de l'écroutissage et l'étude de la flexion que nous ferons ultérieurement.

L'étude de l'allongement de striction présente au contraire un intérêt immédiat.

Il résulte en effet de ce qui précède qu'une barre cylindrique de très grande longueur du fer essayé s'allongera

avant de se rompre de ce que nous avons appelé l'allongement proportionnel, c'est-à-dire de 22 p. 100, tandis que dans la striction même le métal s'allongera de 104 p. 100.

Quel est de ces deux allongements si différents celui qui doit servir de *critérium* pour la qualité du métal et qu'il convient par conséquent de déterminer dans les essais de qualité? Au lieu de choisir l'un ou l'autre, est-il préférable de mesurer, comme le fait la marine, l'allongement moyen sur 200 millimètres, qui tient à la fois des deux, et qui dans le cas actuel est égal à 33 p. 100?

Pour répondre à cette question il faut examiner comment peut se briser le métal.

15. *Rupture des barres percées de trous.* — Les ouvrages métalliques sont en général formés d'un grand nombre de barres réunies par des rivets ou des boulons et percées par conséquent de trous qui y créent des sections dangereuses, où se produisent les ruptures. Nous verrons plus tard que la résistance de ces sections dangereuses est tellement réduite par le vide des trous et en outre par l'altération du métal, lorsque les trous sont poinçonnés, que les sections entières des barres ne travaillent guère qu'aux 50, 60 ou au plus aux 70 centièmes de la charge de rupture, au moment où les sections dangereuses se brisent. Il importe donc peu de mesurer l'allongement proportionnel que les barres prendraient, si leurs sections non percées travaillaient à la charge de rupture, puisqu'elles ne peuvent jamais arriver à cette tension. Ce qu'il est utile de connaître, c'est l'importance des déformations que pourront prendre sans se rompre les parties qui se déformeront réellement, c'est-à-dire les sections dangereuses, et il est évident que ces déformations absolument locales dépendront exclusivement de l'allongement de rupture proprement dit, que nous avons appelé allongement de striction.

16. *Effet des défauts locaux et des angles vifs.* — Nous verrons dans le cours de ce travail que la moindre fente transversale existant dans le métal, dans l'acier surtout, diminue considérablement la résistance qu'il présente à la rupture par une déformation quelconque ou par l'effet d'efforts répétés. Il y a là un danger sérieux, et il importe de rechercher à quels signes on peut reconnaître les métaux qui présentent le plus de garanties à ce point de vue.

Soit une barre de métal ABGH (fig. 9) ayant un com-

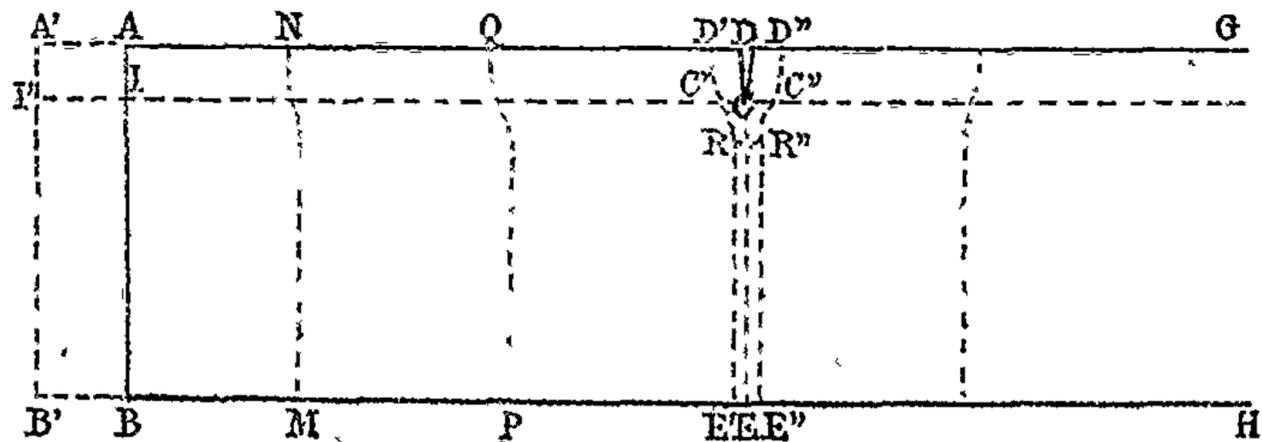


Fig. 9.

mencement de fente CD et soumise à un effort de traction. Si nous considérons une section AB assez éloignée de la fente CD pour qu'elle n'en ressente aucune influence, elle restera plane, et prendra la position A'B' en obéissant à l'effort de traction.

Le prisme ADCI, limité par la section AB et par un plan parallèle à AG passant par l'extrémité de la fente devra donc s'allonger sensiblement autant que la fibre BE par exemple, et cependant, vu l'interruption des fibres en CD, il n'est sollicité par aucun effort agissant sur son extrémité de droite. Son allongement ne peut donc résulter que de l'action d'efforts de cisaillement agissant dans le plan CI, et ensuite avec une intensité moindre, dans les plans voisins de CI.

Ces efforts de cisaillement ne peuvent, comme les ten-

sions de toute espèce, résulter que de déplacements relatifs des molécules, qui dans le cas actuel feront prendre à des sections précédemment planes des formes telles que MN et PQ, et ces déformations ne sont possibles que si la section faite infiniment près de la fente et à sa gauche prend elle-même la forme $E'C'D'$.

Pour les mêmes raisons la section faite à droite de la fente prendra forme $E''C''D''$.

L'écartement des deux sections très rapprochées $E'C'D'$ et $E''C''D''$ sera donc beaucoup plus grand en $C'C''$, c'est-à-dire au contact de la fente qu'en $R'R''$, ou qu'en tout autre point de ces sections. Par suite la fibre la plus voisine de la fente atteindra l'allongement de rupture et se brisera, bien avant que le reste de la section ait pris l'allongement maximum qu'il aurait pu supporter.

Les tensions croissant avec les allongements, il en résulte que les fibres éloignées de la fente auront une tension relativement faible comme leur allongement, au moment où la rupture commencera près de la fente, pour se propager immédiatement dans toute la section, de proche en proche et pour les mêmes raisons.

Une section où il existe une fente se brisera donc sous un effort total bien inférieur à celui que peut supporter une section parfaitement saine, et il est évident que ce qui retardera la rupture, ce sera la faculté qu'aura le métal de prendre, sans se rompre, un allongement considérable dans une zone très limitée autour de l'extrémité de la fente. Il est non moins clair que cette faculté résulte de l'allongement de rupture proprement dit, c'est-à-dire de l'allongement de striction et qu'elle est sans rapport avec l'allongement proportionnel qui n'a de sens que pour les barres de grande longueur à sections absolument constantes et identiques.

C'est donc l'allongement de striction qui donne la mesure des garanties que présentent les métaux au point de vue de

la résistance dans les sections où il existe des défauts locaux.

On se rend compte qu'il en est exactement de même dans les angles vifs qui exercent une influence locale tout à fait analogue à celle des fentes transversales.

Nous verrons ultérieurement que les angles vifs réduisent en effet la résistance du fer de 20 p. 100 environ et celle de l'acier mi-dur qui prend moins de striction, de 33 à 35 p. 100. Il est vraisemblable que, si on faisait l'essai sur des métaux de qualité inférieure prenant peu de striction, on trouverait des pertes de résistance plus considérables encore.

Si on ajoute enfin que la ductilité d'un métal au point de vue de la flexion dépend exclusivement de l'allongement de striction, ainsi que nous l'établirons dans le chapitre III, on est amené à conclure que, pour avoir la mesure de la ductilité du fer et de l'acier, c'est la striction qu'il faut mesurer et non l'allongement proportionnel, ni l'allongement entre des repères éloignés, qui est la somme en proportion variable de l'allongement proportionnel et de l'allongement de striction.

17. *Rapport variable des deux allongements.* — On peut toutefois se demander si l'allongement de striction ne varie pas dans la même proportion que l'allongement proportionnel et l'allongement total mesuré entre repères; car dans ce cas il suffirait de mesurer l'un quelconque de ces éléments pour être fixé sur les autres.

L'expérience prouve qu'il n'en est pas ainsi, et cela résulte en particulier du tableau suivant dans lequel nous avons indiqué pour divers métaux le rapport de l'allongement total entre deux repères a , à l'allongement dans la striction A .

L représente la limite d'élasticité et R la résistance usuelle de traction.

NATURE DU MÉTAL	L	R	α	A	$\frac{A}{\alpha}$	
	k.	k.	p. 100	p. 100		
Fer fin.	19	30,3	33	104	3,1	Métal auquel se rapporte la figure 3. — 4. Types moyens donnés à l'occasion de l'exposition universelle de 1873.
Acier extra-doux.	25	40,3	26	132	5,1	
Types d'acier du Creu- sot (1).		39,3	35	260	7,1	
		46,7	29	160	5,5	
		59,7	23	90	4,0	
		72,0	17	45	2,6	
		78,0	13	28	2,1	

(1) Les chiffres relatifs aux aciers du Creusot sont extraits de l'ouvrage de M. Lebasteur. — Les métaux à l'Exposition universelle de 1873. — Dunod.

NATURE DU MÉTAL	L	R	α	A	$\frac{A}{\alpha}$	
	k.	k.	p. 100	p. 100		
Aciers carburés de Ter- renoire (2).	19,37	35,45	31	200	6,4	Teneur en carbone 0,15 p. 100,
	25,42	48,77	22	67	3,0	— 0,49
	32,47	65,15	11	22	2,0	— 0,809
Aciers manganésés de Terrenoire.	33,76	70,32	5	9	1,8	— 0,875
	25,42	48,77	22	67	3,0	Teneur en Manganèse 0,20 p. 100
	33,8	64,0	19	69	3,6	— 1,06
Aciers phosphoreux de Terrenoire.	42,8	79,7	14	45	3,2	— 1,30
	37,8	55,1	15	31	2,1	Teneur en Phosphore 0,31
Aciers chromés d'U- nieux.	31,4	56,7	23	92	4,0	— 0,25
	46,0	72,0	15	220	14,0	
	59,0	92,0	14,5	64	4,4	

(2) Les chiffres relatifs aux aciers de Terrenoire sont extraits de l'article sur les aciers fait par M. Deshayes pour le Dictionnaire de chimie de M. Wurtz.

L'examen des chiffres de ce tableau fait voir qu'il n'y a pas de proportionnalité entre l'allongement total α et l'allongement de striction A. Le rapport $\frac{A}{\alpha}$ varie en effet de 1,8 à 14,0.

On ne doit pas comparer les résultats obtenus dans des usines différentes, parce que les diamètres des barreaux ont pu différer, et les longueurs entre les repères ont été de 10 centimètres au Creusot, de 13 et de 10 centimètres à Unieux et de 20 centimètres à Terrenoire et dans nos

essais. Mais, en comparant les résultats obtenus dans une même usine, on voit que, lorsque l'acier devient plus dur, l'allongement de striction diminue beaucoup plus rapidement que l'allongement entre repères et *à fortiori* que l'allongement proportionnel, qui serait moindre encore que ce dernier. Ainsi, pour les aciers du Creusot ayant une résistance de 39^k,3 le rapport $\frac{A}{a}$ est égal à 7,4 tandis que pour les aciers de la même usine qui ont une résistance de 78 kilogrammes, il n'a plus qu'une valeur égale à 2,1.

Nous ferons remarquer en passant qu'il y a dans ce fait une nouvelle preuve que l'allongement de striction donne une idée plus exacte de la ductilité que l'allongement entre repères, car il est constant qu'un acier à 39 kilogrammes de résistance est incomparablement plus ductile et peut subir sans se briser des déformations beaucoup plus fortes qu'un acier à 78 kilogrammes.

Les allongements entre repères, qui ont des valeurs respectives de 13 et de 35 p. 100, ne donnent pas une idée exacte de la différence énorme qui existe entre ces deux métaux; les allongements de striction, qui sont de 28 et de 260 p. 100, permettent de se rendre un compte bien plus exact de la nature si profondément différente des aciers durs et des aciers extra doux.

Les chiffres du tableau montrent également qu'à résistance égale la composition chimique influe beaucoup sur le rapport $\frac{A}{a}$. Ainsi pour une même résistance de 70 kilo-

grammes environ, le rapport $\frac{A}{a}$ est voisin de 2 pour les aciers, simplement carburés, de 3,5 pour les aciers riches en manganèse et de 14 pour les aciers chromés, qui ont en effet une supériorité incontestée sur les aciers ordinaires, et que leur prix élevé et les difficultés de fabrication empêchent seuls d'utiliser plus généralement pour les usages,

qui exigent à la fois une grande résistance et beaucoup de ductilité.

18. *Importance de la striction.* — Les considérations qui précèdent démontrent l'importance de la striction et prouvent qu'il y a lieu de la mesurer dans les essais de qualité. Elles conduiraient même logiquement à ne pas se préoccuper de l'allongement proportionnel, puisqu'il ne peut jamais se réaliser dans les pièces ayant des trous, des défauts locaux ou même simplement des variations de section, ce qui est le cas à peu près général dans les constructions de toute espèce.

Nous n'irons pas jusque-là, mais nous concluerons au moins qu'il faut donner une importance prépondérante à l'allongement de striction dans le classement des métaux, contrairement à ce qu'on fait en France.

Si on veut observer en outre l'allongement proportionnel, il faut au moins le dégager de tout élément étranger, en le mesurant entre des repères qui ne comprennent pas

la striction, ou en le calculant par la formule $\alpha = \frac{\sigma}{S} - 1$

au moyen des valeurs observées de σ , section primitive, et de S , section du barreau dans les parties restées cylindriques après la rupture. L'observation se réduirait alors à des mesures de diamètres.

On remplacerait ainsi la notion confuse et sans réalité concrète de l'allongement entre repères par deux notions simples et correspondant à des réalités, d'une part l'allongement proportionnel, qui est celui que prendrait avant rupture une barre cylindrique de section constante et de grande longueur, n'ayant aucun point faible; d'autre part l'allongement de striction, que prend le métal dans les ruptures réelles, qui, toujours, ou peu s'en faut, sont déterminées par des sections affaiblies.

La mesure de la striction a un avantage accessoire qu'il convient de signaler; elle n'est pas influencée, comme la mesure des allongements, par les différences de diamètre des barreaux d'essai, ou tout au moins elle ne l'est que dans une proportion très restreinte. Cette propriété facilite la comparaison de métaux essayés en barreaux de dimensions différentes.

Nous ajouterons que, si en pratique on trouve incommode la mesure de la striction à cause des calculs qu'elle exige pour déterminer les aires de deux sections et leur rapport, on aura un résultat presque équivalent en mesurant l'allongement entre deux repères très voisins comprenant la section étranglée; car alors, l'allongement proportionnel sera à peu près éliminé et l'allongement total ne dépendra guère que de la striction.

19. *Travail élastique et travail de rupture.* — Le travail résistant que produit une tige de métal en prenant un allongement déterminé est égal à la somme des produits des allongements élémentaires par les tensions correspondantes, c'est-à-dire à la portion de l'aire de la courbe de déformation qui correspond à l'allongement considéré.

Le travail élastique est celui que le métal peut supporter sans dépasser la limite d'élasticité; il est sensiblement égal à l'aire d'un triangle ayant pour hauteur la limite d'élasticité et pour base l'allongement correspondant. L'égalité serait parfaite si la courbe de déformation n'était pas convexe.

En ce qui concerne le travail de rupture, il faut faire les mêmes distinctions que pour l'allongement de rupture. On admet en général qu'il est égal à l'aire de la courbe conventionnelle OLMR, ce qui faux est dans tous les cas (fig. 1, Pl. XIV).

S'il s'agit d'une barre cylindrique de grande longueur, pour laquelle l'effet de l'allongement de striction est négli-

geable, le travail de rupture par mètre de longueur et par millimètre carré de section est égal à l'aire de la courbe OLP limitée à l'ordonnée Pp , Op étant l'allongement proportionnel en dehors de la striction.

S'il s'agit d'une barre ayant précisément la longueur de 200 millimètres qui existait entre les repères dans l'essai représenté par la figure 1, le travail de rupture est égal à l'aire de la courbe OLNS qui représente les efforts totaux réels, en tenant compte de leur diminution après la striction. La portion de ce travail produite par la striction est donc $pPSs$.

Enfin, si l'on considère le métal de la section contractée, le travail de rupture qu'il produit, rapporté à 1 mètre de longueur, est égal à l'aire de la courbe OLN'R'. Comme on devait s'y attendre, ce travail est bien supérieur à celui qui est produit par des barres plus longues.

CHAPITRE III.

COMPRESSION, CISAILLEMENT, FLEXION ET TORSION.

Compression.

20. Les essais par compression donnent difficilement des résultats certains au point de vue de la limite et du coefficient d'élasticité, parce que la crainte des flexions latérales force à les faire sur des barres de faible longueur, dont les raccourcissements élastiques ne peuvent guère être mesurés avec précision. Cependant il semble résulter des expériences les mieux faites que le coefficient et la limite d'élasticité sont à peu près les mêmes pour la compression et pour la tension.

Les essais de rupture paraissent beaucoup plus faciles

à exécuter avec précision. Il faut croire qu'ils présentent au contraire des difficultés spéciales, car il y a un désaccord absolu entre les résultats obtenus par divers expérimentateurs.

C'est ainsi qu'aux usines de Terrenoire on a obtenu la résistance énorme de 407 kilogrammes par millimètre carré pour des aciers coulés (*), tandis que la Staatsbahn (Autriche) a constaté des résistances variant de 91 à 216 kilogrammes pour des aciers laminés de diverses duretés et que M. Bauschinger a trouvé pour des aciers analogues des résistances comprises entre 47^k,8 et 98^k,90 (**).

Pour le fer, la Staatsbahn a trouvé des résistances à la compression comprises entre 73 et 100 kilogrammes, tandis qu'on admet généralement 35 à 45 kilogrammes et parfois même 25 à 30 kilogrammes.

Heureusement il est rarement nécessaire d'être fixé sur ce point en ce qui concerne le fer et l'acier, car il est constant que les pièces d'une certaine longueur ne se brisent jamais par écrasement simple, mais bien par suite de flexions latérales, ainsi qu'Hodgkinson l'a démontré depuis longtemps. Dans ces flexions, comme dans toutes les autres, la résistance à la traction intervient et est la cause habituelle des ruptures. Il importe peu par conséquent de connaître exactement la résistance à la compression, que l'on sait en tous cas être supérieure à la résistance à la traction.

Cisaillement.

21. Le cisaillement est l'action qui se produit entre deux sections très rapprochées, auxquelles les forces extérieures tendent à donner un mouvement relatif parallèle à leur plan commun. Ce genre de travail se produit surtout dans

(*) Ouvrage déjà cité de M. Lebasteur.

(**) *Festigkeit und dimensionenberechnung der Eisen und Stahl-Constructionen.* Leipzig, Teubner, 1876.

les rivets et boulons et présente un grand intérêt à ce point de vue.

Pour le fer, de nombreux essais ont prouvé que la résistance au cisaillement perpendiculaire aux fibres est égale aux $\frac{80}{100}$ en moyenne de la résistance à la traction (Lebasteur, Weyrauch).

Pour l'acier le rapport est à peu près le même pour les qualités très douces, mais il est moins élevé pour les nuances plus dures, ainsi qu'il résulte des chiffres ci-dessous obtenus par M. Bauschinger (*).

TENEUR P. 100 en carbone.	RÉSISTANCE à la traction.	RÉSISTANCE au cisaillement.	RAPPORT des deux résistances.
0,14	44,30	34,10	0,77
0,19	47,85	37,10	0,77
0,46	53,30	35,85	0,67
0,55	56,50	40,00	0,71
0,66	62,95	42,80	0,66
0,80	72,30	48,20	0,67
0,96	83,05	58,20	0,70

Le rapport des deux résistances serait donc voisin de 0,77 environ pour les aciers très doux et de 0,70 à 0,66 pour les aciers plus durs.

Les aciers extra doux étant les seuls qui soient employés pour le rivetage, on peut admettre sans erreur sensible que la résistance au cisaillement des rivets de fer et d'acier est égale aux $\frac{80}{100}$ de leur résistance à la traction.

L'effort tranchant qui se produit dans les pièces soumises à la flexion est un cisaillement perpendiculaire aux fibres du métal, tout à fait analogue au cisaillement des

(*) Bauschinger. *Zeitschrift d. Bairische. Architect und Ing. Vereins*, 1873, § 81.

rivets, et la résistance que le métal lui oppose doit être comme dans les rivets, égale aux $\frac{80}{100}$ de la résistance à la traction.

Quant à la tendance au glissement longitudinal des fibres les unes sur les autres, qui accompagne forcément l'effort tranchant dans les pièces soumises à la flexion, c'est aussi un cisaillement; mais au lieu d'être perpendiculaire aux fibres, il leur est parallèle. Par suite de sa constitution fibreuse ou lamelleuse, le fer présente au cisaillement parallèle au sens du laminage une résistance qui, d'après les essais de M. Bauschinger cités par M. Weyrauch, est un peu moindre que la résistance perpendiculaire au laminage; mais la différence est assez faible, pour qu'on puisse n'en pas tenir compte dans la pratique.

Il en serait tout autrement si on avait à calculer la résistance d'une tôle ou bande de fer laminée à un glissement parallèle à sa surface. Il résulte en effet des expériences déjà citées que la résistance du fer à ce genre spécial de cisaillement n'est guère que la moitié de sa résistance à la traction, par suite du peu d'adhérence qu'ont entre elles les lamelles de métal séparées par de minces couches de scories qui forment les tôles ou bandes de fer fortement aplaties par le laminage.

Cette observation a peu d'intérêt pratique, ou du moins nous ne connaissons pas de cas où la résistance en question soit mise fortement en jeu dans les grandes constructions.

Quant au coefficient d'élasticité de cisaillement, il résulte tant de calculs théoriques que d'essais directs qu'il est sensiblement égal aux $\frac{2}{5}$ du coefficient d'élasticité de traction, c'est-à-dire à $8,8 \times 10^9$. On n'a pas fréquemment occasion d'utiliser cet élément dans les calculs de résistance.

Flexion.

22. *Utilité de l'étude de la flexion.* — On sait que la flexion n'est pas une déformation simple d'une nature spéciale ; c'est le résultat de tractions, de compressions et de cisaillements combinés.

Les fibres extrêmes, par lesquelles commence presque toujours la rupture, ne sont soumises qu'à des tractions simples d'un côté de l'axe neutre et à des compressions simples de l'autre, les efforts de cisaillement ne se développant que dans les fibres intérieures. De ce fait on a généralement conclu que la rupture par flexion n'est en somme qu'une rupture par traction ou par compression, qu'elle ne mérite pas d'étude spéciale et qu'il suffit à tous les égards d'établir une formule donnant, en fonction du moment de flexion, les tensions et les pressions, qui se développent dans une barre fléchie et d'adopter pour leurs valeurs les mêmes limites que pour celles des tensions et des pressions simples.

La formule que l'on applique dans ce but est $T = \frac{Mn}{I}$

dans laquelle T représente la tension ou la pression des fibres extrêmes, n la distance de ces fibres à l'axe neutre, I le moment d'inertie de la section,

M le moment de flexion auquel elle est soumise.

Cette formule suppose, comme toutes celles de la résistance classique des matériaux, que les allongements et les raccourcissements des fibres sont proportionnels aux efforts ; aussi tous les auteurs d'ouvrages théoriques ont-ils fait observer qu'elle ne peut être employée que jusqu'à la limite d'élasticité.

Certains expérimentateurs ont méconnu cette vérité et ont commis des erreurs en se servant de cette formule en dehors des limites où elle est applicable et en déduisant des lois des chiffres erronés qu'ils ont ainsi obtenus.

Quelques-unes de ces lois ayant une importance capitale, nous avons cru nécessaire de faire une étude minutieuse de la flexion, afin de déterminer l'étendue des erreurs dont elles sont entachées.

Cette étude nous a amené à reconnaître que la résistance à la flexion des diverses qualités de fer et d'acier ne varie pas dans la même proportion que leur résistance à la traction, comme on l'admet généralement, et qu'il ne semble pas rationnel d'imposer aux métaux ductiles les mêmes limites d'efforts dans la flexion que dans la traction simple.

Nous allons chercher à établir ces deux points.

23. *Essais de M. Bauschinger.* — M. Bauschinger a fait des essais de flexion sur les barreaux d'acier dont nous avons déjà indiqué au paragraphe 21 les résistances à la traction et au cisaillement. A défaut d'autre formule, il a employé celle que nous avons rappelée plus haut pour déterminer les tensions que les fibres extrêmes avaient dû supporter, d'après les valeurs des moments de flexion imposés aux barreaux. Le tableau suivant donne les chiffres qu'il a ainsi obtenus et que nous appellerons résistances à la flexion.

TENEUR P. 100 en carbone.	RÉSISTANCE A LA		RAPPORT DE LA RÉSISTANCE à la flexion à la résistance à la traction.
	TRACTION	FLEXION	
0,14	k. 44,30	k. (79,20) ⁽¹⁾	(1,78)
0,19	47,85	(86,00) ⁽²⁾	(1,79)
0,46	53,30	83,40	1,56
0,55	56,50	88,25	1,58
0,66	62,95	86,00	1,36
0,80	72,30	76,45	1,06
0,96	83,05	84,80	1,02

(1) et (2) Les barreaux d'acier doux auxquels se rapportent les deux premières lignes du tableau n'ont pas pu être rompus par flexion. Leur résistance réelle à la flexion était donc supérieure aux chiffres indiqués.

Ces chiffres montrent qu'il y a désaccord entre l'expérience et les résultats donnés par la formule usuelle de la flexion appliquée en dehors de ses limites légitimes, ce qui n'a rien d'imprévu, mais ils prouvent aussi que l'écart est si considérable et si variable d'une qualité à l'autre qu'il convient de le prendre en sérieuse considération.

Des faits analogues ont conduit les praticiens à admettre et l'Administration française des Travaux Publics à décider que la fonte travaillant par traction dans les pièces fléchies pourrait être soumise à des efforts deux fois plus élevés que la fonte travaillant par traction simple. On peut se demander pourquoi il en est autrement pour les aciers doux qui présentent au point de vue de la flexion la remarquable supériorité mise en lumière par les essais de M. Bauschinger, et pour le fer lui-même qui est dans les mêmes conditions, comme nous le verrons plus tard.

Pour reconnaître si cette différence de traitement est motivée, il fallait rechercher la nature des causes qui produisent la supériorité de résistance à la flexion des fers, des aciers et des fontes. Nous avons fait dans ce but les expériences que nous allons décrire.

24. *Flexion d'un barreau d'acier carré de 39 millimètres.* — Nous avons pris une barre d'acier carrée de 39 millimètres donnant par l'essai de traction directe une résistance à la rupture de $42^k,70$ et un allongement de rupture de 20 p. 100 mesuré entre des repères espacés de 200 millimètres.

Un morceau de 300 millimètres de longueur a été découpé dans cette barre. Une de ses arêtes a été divisée en parties égales de 10 millimètres et à partir de chacune de ces divisions, on a tracé avec une pointe fine sur les quatre faces du barreau des lignes droites, perpendiculaires aux arêtes, qui figuraient les traces d'une série de plans parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe du barreau.

Le barreau ainsi préparé a été placé sur deux appuis invariables espacés de 203 millimètres et on a fait porter sur le milieu de sa face supérieure le levier d'une machine d'essai ayant 47 millimètres d'épaisseur.

Le plateau de la machine a été ensuite chargé progressivement, mais on n'a pas pu arriver à rompre le barreau et l'essai a dû être arrêté au moment où la flèche était égale à 54 millimètres, la courbure excessive qui s'est produite à ce moment ayant fait craindre le renversement des points d'appui.

On a observé les faits suivants :

1° La pression que le levier exerçait sur le barreau sans le rompre était de 18 710 kilogrammes. Le moment de flexion produit par cet effort était par suite :

$$M = \frac{18\,710^k}{2} \times \frac{0^m,203 - 0^m,047}{2} = 729^{km},70.$$

La formule usuelle de la flexion $T = \frac{Mn}{I}$ ou $M = \frac{TI}{n}$ devient pour un barreau carré ayant une épaisseur h ,
 $M = \frac{Th^3}{6}$.

En y remplaçant h par sa valeur 0^m,039 et T par la résistance à la traction du métal essayé que nous savons être 42 700 000 kilogrammes par mètre carré, on trouve :

$$M = 422^{km},16.$$

Le moment de flexion de 729^{km},70 ayant été supporté sans rupture, il en résulte qu'un barreau d'acier doux, qui a une résistance à la traction, de 42^k,70, présente une résistance à la flexion $\frac{729,70}{422,16} = 1,73$ fois plus forte au moins que celle qu'on obtiendrait par la formule de la flexion, en se basant sur la valeur connue de la résistance à la traction.

La différence doit même être beaucoup plus grande en

réalité, puisque le moment de flexion de $729^{km},70$ a été supporté sans rupture et avec un allongement de 30 p. 100, très inférieur à celui que le métal aurait pu prendre sans se rompre comme nous le verrons ultérieurement.

2° La section du prisme qui était primitivement un carré de 39 millimètres a pris dans la partie moyenne du barreau la forme représentée par la figure 10. On voit que sa hauteur

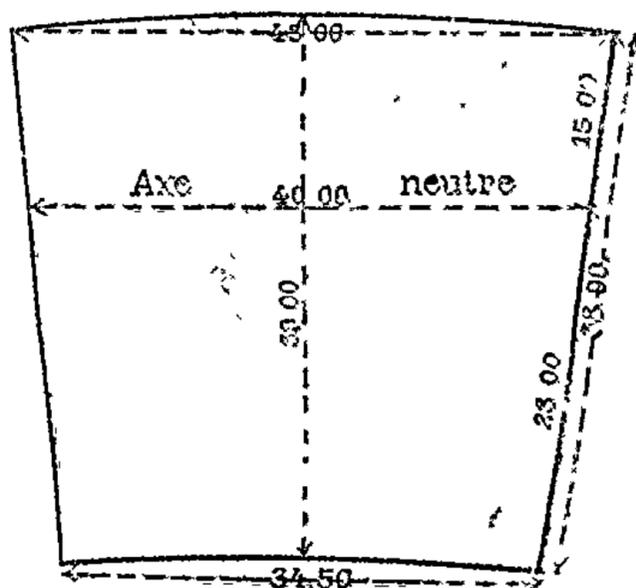


Fig. 10.

est restée sensiblement constante ainsi que son aire, qui était avant la déformation de $39^2 = 1521$ millimètres carrés et après la déformation de

$$\frac{43 + 34,5}{2} \times \frac{38 + 39}{2} = 1491 \text{ millimètres carrés.}$$

Cette forme s'est réalisée sur une longueur de 50 millimètres environ sous le levier de la machine d'essai, c'est-à-dire partout où le moment de flexion avait sa valeur maximum.

Il ne s'est donc produit dans cette expérience de flexion rien d'analogue à la striction qui précède la rupture par traction.

3° Au milieu du barreau les traits parallèles, tracés à 10 millimètres d'écartement sur la face inférieure, étaient après la flexion espacés de 13 millimètres. Les fibres

extrêmes travaillant par traction s'étaient donc allongées de 30 p. 100.

Les traits tracés au même écartement sur la face supérieure n'étaient plus distants que de 8^{mm},25 après la flexion. Les fibres extrêmes comprimées s'étaient donc raccourcies de 17,5 p. 100.

Or nous avons vu que l'acier de la barre essayée avait donné par traction simple un allongement de 20 p. 100, mesuré entre les repères espacés de 200 millimètres, ce qui doit correspondre à 13 p. 100 environ d'allongement proportionnel, mesuré en dehors de la striction. Nous arrivons donc à constater qu'un acier, qui dans la traction simple ne s'allonge que de 13 p. 100 en dehors de la striction, a pris par flexion sans se rompre et sans éprouver de striction un allongement de 30 p. 100.

4° Les traits tracés parallèlement sur les faces latérales du prisme sont restés, même dans la partie la plus déformée, assez parfaitement rectilignes pour que nous n'ayons pu y découvrir aucune trace de courbure.

Quant aux traits tracés parallèlement sur les faces supérieures et inférieures, ils sont restés rectilignes et en outre parallèles.

Ces faits prouvent que, dans toute la partie visible du prisme, les sections planes sont restées planes après la déformation considérable qu'il a subie. Ils permettent de conclure avec une grande vraisemblance qu'il en est de même à l'intérieur du barreau.

En partant de ces résultats, il est possible de déterminer la position de l'axe neutre. En effet on a vu que les fibres extrêmes avaient subi d'un côté un allongement de 30 p. 100 et de l'autre un raccourcissement de 17,5 p. 100. Les sections étant restées planes, il en résulte que l'axe neutre était aux $\frac{30}{30 + 17,5} = \frac{63}{100}$ de la hauteur du prisme à partir des fibres travaillant par extension.

Ce fait a été vérifié directement sur les faces latérales du prisme en recherchant la ligne des points qui étaient restés à l'écartement primitif de 10 millimètres; elle a été trouvée distante de la face inférieure de 23 millimètres, c'est-à-dire bien sensiblement des $\frac{63}{100}$ de la hauteur du prisme.

L'axe neutre étant ainsi connu, on a pu calculer l'aire de la partie de section travaillant par extension qui a été trouvée de $23 \times \frac{40 + 34,5}{2} = 856^{\text{mm}},75$.

L'aire de la partie comprimée était donc seulement de $1491,00 - 856,75 = 634^{\text{mm}},25$.

L'expérience n'ayant pu être poussée jusqu'à la rupture, nous avons fait un second essai.

25. *Flexion d'un barreau d'acier carré de 16^{mm},5.* — Nous avons pris une barre carrée d'acier laminé de 16^{mm},5 de côté, dont l'analyse a donné les résultats suivants :

MANGANÈSE	CARBONE	SOUFRE	PHOSPHORE	SILICIUM
0,720 p. 100	0,300 p. 100	0,020 p. 100	0,073 p. 100	Traces.

L'essai de traction fait sur un barreau rond de 9^{mm},5 de diamètre et de 200 millimètres de longueur tourné dans cette barre a donné les résultats consignés au tableau n°1 joint à cette note et notamment les chiffres suivants qui en sont extraits.

Limite d'élasticité.	34 ^k ,4
Résistance à la rupture rapportée à la section primitive.	57 ^k ,8

Résistance à la rupture rapportée à la section contractée	107 ^k ,5
Allongement p. 100 mesuré entre repères.	12 p. 100
Allongement p. 100 dans la striction.	100 p. 100

Un morceau de cette barre carrée de 16^{mm},5 de côté a été, comme dans l'essai précédent, marqué sur ses quatre faces de traits parallèles espacés de 10 millimètres, puis saisi dans une griffe par l'une de ses extrémités. A l'autre on a suspendu un plateau que l'on a chargé progressivement de poids et on a observé les faits suivants :

1° Au moment où les traits tracés sur la face extérieure du barreau ont pris un écartement de 12 millimètres, ce qui correspond à un allongement des fibres extrêmes égal à 20 p. 100, on a mesuré le moment de flexion produit par le plateau et le poids dont il était chargé. Il était égal à 77^{km},12.

On a continué à charger le plateau jusqu'au moment où, par suite de la courbure excessive de la barre, il est devenu impossible de continuer l'expérience. On a constaté qu'à ce moment l'allongement des fibres extérieures était de 39 p. 100 et le moment de flexion supporté par la barre égal à 83^{km},84.

Si à ces chiffres résultants de l'expérience on compare la valeur du moment de rupture, que donnerait la formule

$$M = \frac{TI}{n} = \frac{Th^3}{6}, \text{ en y remplaçant } T \text{ par } 57\,800\,000 \text{ kilogra-}$$

mètres, résistance usuelle à la traction du métal par mètre carré et h par 0^m,0165, on obtient $M = 43^{\text{km}}$,10.

Par conséquent le moment de flexion que la barre a supporté sans rupture, lorsque ses fibres extrêmes ont pris un allongement de 39 p. 100, a été $\frac{83,84}{43,10} = 1,95$ fois

plus grand que le chiffre donné par la formule, et le moment de rupture que nous n'avons pas pu mesurer aurait eu une valeur plus considérable encore.

2° Pour obtenir la rupture de la barre ainsi ployée, on a d'abord serré sa partie déjà courbée entre les mâchoires d'un étau, puis, lorsque cet outil est devenu impuissant, on l'a frappée à coups de marteau. Quelque brutal que fût ce mode d'opérer, la barre d'acier ne s'est brisée que lorsque ses fibres extérieures eurent pris un allongement de 78 p. 100. La rupture commença par les fibres comprimées, par suite de la réaction élastique qui se produisit après un coup de marteau entre la barre et son extrémité recourbée, qui avait fini par la toucher. Sans cet accident l'allongement des fibres extérieures aurait dépassé 78 p. 100 et aurait été sans doute voisin de 100 p. 100, valeur de l'allongement de striction.

3° Le prisme qui était primitivement un carré de 16^{mm},5 a pris dans la section de rupture la forme représentée par la figure 11 dont l'aire est égale à 290 millimètres carrés,

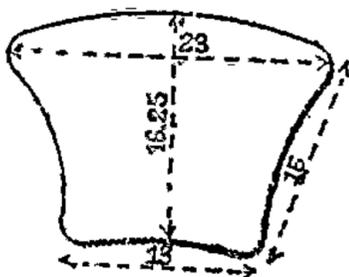


Fig. 11.

c'est-à-dire supérieure à la section primitive qui était égale à $\overline{16,5}^2 = 272$ millimètres carrés. Il s'est donc produit un effet qui est le contraire de la striction.

Les traits tracés sur les quatre faces du barreau étaient restés partout rectilignes, sauf dans le voisinage immédiat de la section de rupture, où ils avaient pris des flèches de $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{4}$ de millimètre à peine.

Au moment où les fibres extérieures avaient un allongement de 39 p. 100, les fibres intérieures s'étaient raccourcies de 26 p. 100; l'axe neutre était donc alors aux

$$\frac{39}{39 + 26} = \frac{60}{100} \text{ de la hauteur du prisme.}$$

Après la rupture, les fibres comprimées s'étaient raccourcies de 35 p. 100, lorsque les fibres extérieures s'étaient allongées de 78 p. 100. L'axe neutre était donc alors aux

$$\frac{78}{78 + 35} = \frac{69}{100} \text{ de la hauteur.}$$

26. *Flexion d'un barreau de fer carré.* — Nous avons fait un essai identique sur une barre de fer ordinaire de Decazeville ayant une section rectangulaire de 15^{mm},6 de hauteur et de 16^{mm},3 de largeur.

Deux barreaux de 9^{mm},5 de diamètre tournés dans cette barre ont été essayés à la traction. Le premier s'est brisé sans allongement sensible et sous une faible charge par suite d'un défaut local; le second présentait également dans la cassure un défaut qui a hâté la rupture et n'a pas laissé à la striction le temps de se produire. Sur toute la longueur des fragments de ce barreau on distinguait le long de l'une des génératrices des criqures qui provenaient évidemment d'une mise exceptionnellement mauvaise, dont la rupture avait provoqué celle du barreau tout entier. Nous en avons eu la preuve en pliant les fragments de ce barreau. Avec la génératrice criquée en dehors, nous avons obtenu la rupture au premier coup de marteau sans aucune courbure, tandis qu'en la mettant en dedans nous avons plié le barreau de 130 degrés avant de le briser.

Il résulte de ces faits que le fer sur lequel nous avons opéré était extrêmement irrégulier. Nous rendrons compte cependant des essais de flexion que nous en avons faits avant d'être édifié sur ce manque d'homogénéité; on peut en tirer d'utiles conclusions.

Les essais de traction du second barreau de ce métal ont donné :

Limite d'élasticité.	26 ^k ,7
Résistance à la rupture rapportée à la section primitive	40 ^k ,9

Allongement pour 100 mesuré entre les repères 6 p. 100
Striction nulle.

L'essai de flexion, exécuté comme celui du barreau d'acier de 16^{mm},5, a donné les résultats suivants :

1° La rupture a été produite sous l'action d'un moment de flexion égale à 52 kilogrammètres.

Le moment de rupture calculé par la formule

$$M = \frac{TI}{n} = \frac{Tab^2}{6}$$
 en y remplaçant T par 40 900 000 kilogrammes, résistance à la traction par mètre carré, *a* et *h* par leurs valeurs 0^m,0163 et 0^m,0156 est égal à 26^{km},97.

Le moment de rupture réel a donc été $\frac{52,00}{26,97} = 1,92$ fois plus fort que le moment ainsi calculé.

2° L'allongement des fibres extrêmes au moment de la rupture a atteint 25 p. 100, chiffre supérieur à l'allongement constaté dans l'essai de traction.

27. *Essai d'un morceau de fer rond de 9^{mm},07.* — Un morceau de fer rond, qualité ordinaire, ayant 9^{mm},07 de diamètre, a été plié à bloc sans que la rupture se produisît. La section la plus fatiguée est restée presque parfaitement circulaire avec des diamètres variant entre 9^{mm},45 et 9^{mm},75. Elle a donc augmenté de surface, au lieu de prendre de la striction.

Des traits tracés à 5 millimètres d'écartement sur la génératrice extérieure étaient distants de 8^{mm},5 après la flexion. Le fer a donc pris, sans se briser, un allongement de 70 p. 100 et cependant, vu sa qualité médiocre, il était incapable de prendre par traction simple un allongement proportionnel de plus de 15 p. 100 avant rupture.

28. *Conséquences de ces essais.* — Des essais que nous

venons de faire connaître et de ceux de M. Bauschinger résultent les faits suivants :

« Le moment de rupture par flexion des fers et des
« aciers n'est nullement proportionnel à leur résistance à
« la traction rapportée à la section primitive.

« Si on prend comme terme de comparaison la valeur
« que donnerait pour ce moment la formule de la flexion

« $M = \frac{RI}{n}$, on reconnaît que le moment réel de rupture lui

« est sensiblement égal pour les aciers durs et peu duc-
« tiles, mais qu'il en est le double environ pour les aciers
« et les fers ductiles. Pour les métaux intermédiaires, le
« rapport du moment réel de rupture au moment ainsi cal-
« culé a des valeurs comprises entre 1 et 2 et croissant en
« proportion de la ductilité.

« Dans la flexion poussée au delà de la limite d'élasticité,
« l'axe neutre cesse de passer par le centre de gravité de
« la section. Il s'éloigne d'autant plus des fibres extérieures
« que la déformation est poussée plus loin.

« Il n'y a dans la flexion rien d'analogue au phénomène
« de la striction. La section totale reste sensiblement con-
« stante, et l'aire de la partie de cette section qui tra-
« vaille par traction augmente jusqu'à la rupture par suite
« du déplacement de l'axe neutre.

« L'allongement des fibres extrêmes qui se produit dans
« la flexion est considérablement plus fort que l'allonge-
« ment de traction mesuré entre repères et *à fortiori* que
« l'allongement proportionnel de traction. Il est égal, ou
« peu s'en faut, à l'allongement qui se produit dans la
« striction résultant de la traction simple.

« Les sections planes ne se déforment que dans le voi-
« sinage de la rupture et d'une manière très peu sensible. »

Nous allons chercher à tirer les conséquences de ces faits.

Ce qui doit d'abord fixer l'attention c'est que, comme on vient de le voir, il se produit dans la flexion un fait

absolument opposé à la striction. La section totale reste sensiblement constante et le déplacement de l'axe neutre entraîne une augmentation importante de l'aire de la partie de section qui travaille par traction. On a vu en effet, dans notre première expérience que de sa valeur primitive de $\frac{1\ 521}{2} = 760^{\text{mm}},50$ l'aire des fibres allongées s'est élevée à $856^{\text{mm}},75$ par suite de la flexion, ce qui constitue une augmentation de plus de 12 p. 100. Dans tous nos essais nous avons remarqué des faits analogues.

Si donc, dans la traction, on pouvait être amené à prêter peu d'attention à la résistance considérable que le métal possède dans la section contractée au moment de la rupture, parce que ses effets sont compensés et au delà par la contraction même de cette section, et s'il était logique dans ce cas de ne considérer que la notion abstraite de la résistance rapportée à la section primitive, qui permet de calculer immédiatement l'effort total qu'une barre peut supporter, il n'existe rien de pareil dans la flexion et cette notion n'y a plus aucun sens.

La tension des fibres étant fonction de leur allongement, il nous semble certain que dans la flexion les fibres extrêmes prennent la même tension que dans la section contractée de la striction produite par la traction simple, puisqu'elles prennent le même allongement.

Le premier point pour arriver à expliquer la grande résistance, que les métaux ductiles présentent à la flexion, est donc d'admettre qu'au moment de la rupture, les fibres allongées extrêmes ont une tension égale à la résistance de striction R^s et non à la résistance rapportée à la section primitive R . La différence est importante. Ainsi, pour l'acier dont l'essai a été décrit au paragraphe 25, le rapport $\frac{R^s}{R}$ est

$$\text{égal à } \frac{107,5}{57,8} = 1,87.$$

Toutefois, alors même qu'on remplacerait R pour R^s dans la formule de la flexion, on n'aurait pas encore la valeur exacte du moment de rupture, parce que les efforts ne sont pas proportionnels aux déformations, et parce que l'axe neutre ne passe pas par le centre de gravité, comme on a dû le supposer pour établir cette formule.

Nous allons mettre en évidence par une construction graphique, le mécanisme de la flexion et la part qui revient à chaque cause dans la valeur élevée du moment réel de rupture.

29. *Détermination graphique du moment de flexion au moyen des résultats de l'essai de traction.* — Prenons comme exemple le barreau d'acier dont nous venons de parler et dont l'essai a été décrit au paragraphe 25 et considérons-le à l'instant où il supportait un moment de flexion de $83^{\text{km}},84$ avec un allongement des fibres extrêmes égal à 39 p. 100. Sa section mesurée à ce moment était un trapèze curviligne ayant $16^{\text{mm}},72$ de hauteur avec des bases de $14^{\text{mm}},25$ et de $19^{\text{mm}},50$.

L'axe neutre passait aux $\frac{60}{100}$ de la hauteur, c'est-à-dire à $10^{\text{mm}},02$ de distance des fibres extérieures, et la largeur de la section mesurée suivant l'axe neutre était égale à $16^{\text{mm}},75$.

L'aire de la portion de section qui travaillait par allongement était donc $\frac{16,75 + 14,25}{2} \times 10,02 = 155^{\text{mm}},3$ et

l'aire de la portion de section comprimée était

$$\frac{19,50 + 16,75}{2} \times 6,70 = 121^{\text{mm}},4.$$

Représentons (fig. 12) cette section en C',R',R'',C'' et traçons l'axe Ox parallèle à sa hauteur et l'axe Oy en prolongement de l'axe neutre $O'O''$.

A partir de l'axe Ox élevons au-dessus de chaque point

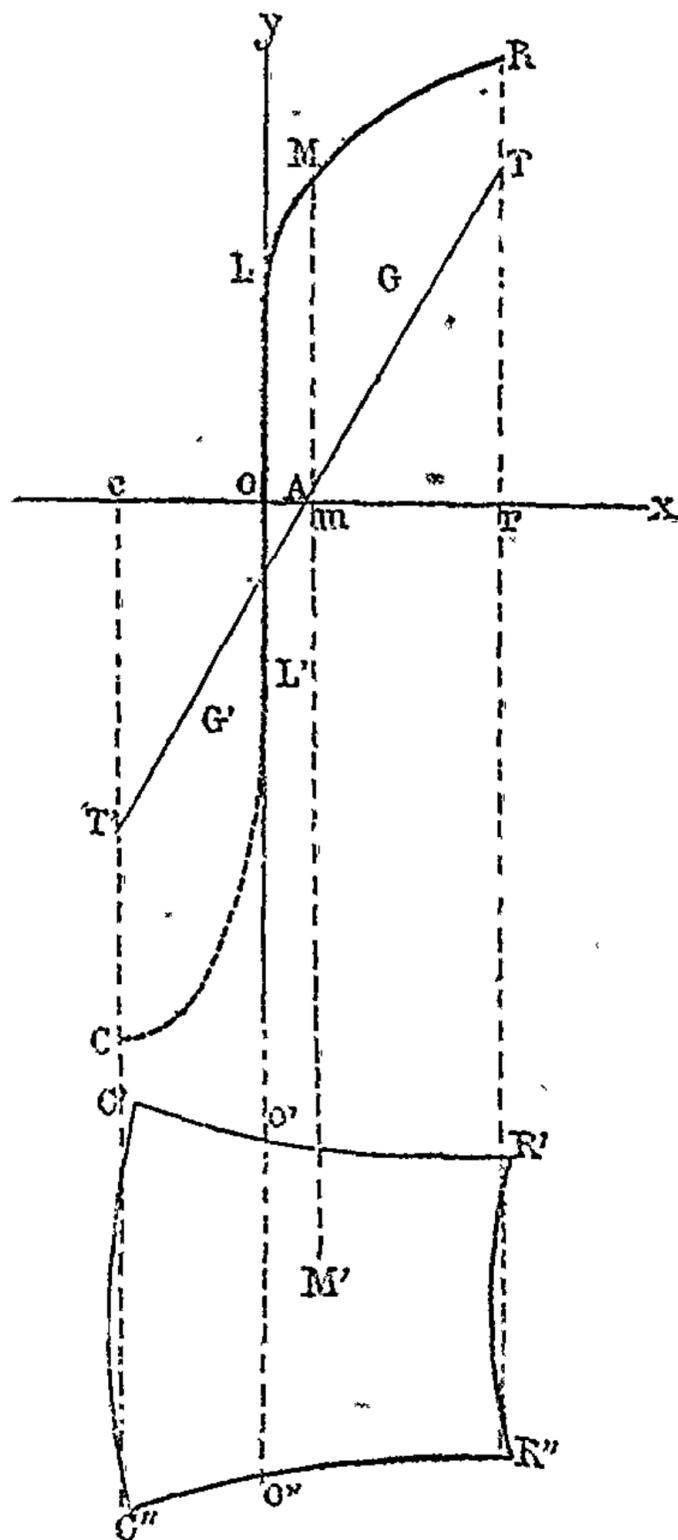


Fig. 12.

de la section du prisme une ordonnée représentant sa tension. Les fibres extrêmes R'R'' s'étant allongées de 39 p. 100, l'ordonnée rR tracée au-dessus d'elles sera la tension qui correspond à cet allongement.

Le tableau annexe n° 1 qui donne les résultats complets de l'essai par traction d'un barreau rond prélevé dans la même barre nous permet de trouver la valeur de cette tension. En effet, lorsque les fibres s'allongent de 39 p. 100

la section est divisée par 1,39 et le diamètre par $\sqrt[2]{1,39}$. Le moment où le barreau essayé par traction a pris un allongement égal à 39 p. 100 est donc celui où son diamètre qui était primitivement de 9^{mm},5 était réduit à $\frac{9,5}{\sqrt[2]{1,39}} = 8^{\text{mm}},0$.

Le tableau n° 1 montre qu'à cette valeur de 8^{mm},0 pour le diamètre du barreau correspond une valeur de l'effort total supporté égale à 3 925 kilogrammes. La tension des fibres, correspondant à l'allongement de 39 p. 100 est donc égale à $\frac{3\ 925^{\text{k}}}{\frac{\pi}{4} 8^2} = 78^{\text{k}},20$; c'est la valeur à donner à l'ordonnée rR .

On obtient de la même manière les autres ordonnées de la courbe OLR, qui n'est pas autre chose qu'une partie de la courbe de déformation du métal par traction, limitée à l'abscisse 39 p. 100 et à l'ordonnée correspondante 78^k,20.

En effet, si on considère un point M' quelconque de la section, son allongement sera à celui de la fibre R' dans le rapport $\frac{Om}{Or}$, par suite de la conservation des sections planes. Si donc Or représente l'allongement du point R', Om représentera l'allongement du point M' à la même échelle, et par suite dans la courbe OLR, à une ordonnée représentant la tension d'une fibre correspondra une abscisse représentant l'allongement de la même fibre, ce qui est précisément la définition de la courbe de déformation réelle par traction. Nous l'avons tracée par points au moyen des chiffres du tableau n° 1 déjà cité.

La courbe OLR ainsi obtenue, il est facile de mesurer son ordonnée moyenne, c'est-à-dire la tension moyenne de la partie de section O'R'R''O'', que l'on trouve ainsi égale à 61 kilogrammes. La somme des tensions développées dans cette partie de section a donc pour valeur :

$$155^{\text{mm}},3 \times 61^{\text{k}} = 9473^{\text{k}},3.$$

La résultante de ces tensions passe par le centre de gravité G de l'aire de la courbe OLR qui est distant de $5^{\text{mm}},6$ de l'axe Oy; le moment produit par les tensions existant dans la section du prisme fléchi est donc égal à

$$9473^{\text{k}},3 \times 0^{\text{m}},0056 = 53^{\text{km}},05.$$

Il reste à déterminer le moment de flexion produit par les compressions qui se développent dans la partie de section C'O'O''C''. Pour le faire exactement, il faudrait connaître la courbe de déformation par compression, comme on connaît celle de la traction. Faute de cet élément, nous arriverons à un résultat très approché de la manière suivante.

Dans un prisme horizontal supportant un effort vertical, comme c'est le cas actuel, l'équilibre exige que la somme des pressions existant dans une section transversale quelconque soit égale à la somme des tensions qui se produisent dans la même section.

Dans le cas actuel, la somme des pressions doit donc être égale à $9473^{\text{k}},3$, valeur précédemment déterminée de la somme des tensions. Pour avoir le moment résistant qu'elles produisent, il ne reste plus qu'à trouver la distance à l'axe Oy de la résultante de ces pressions, c'est-à-dire du centre de gravité G' de l'aire de la courbe inconnue des pressions.

La somme des pressions étant égale à $9473^{\text{k}},3$ et l'aire de la partie de section qui les produit étant, comme nous l'avons vu, de $121^{\text{mm}^2},4$, la pression moyenne est égale à $\frac{9473^{\text{k}},3}{121^{\text{k}},4}$ c'est-à-dire à 78 kilogrammes par millimètre carré.

La courbe des pressions doit donc satisfaire à deux conditions connues; elle a une ordonnée moyenne égale à 78 kilogrammes et en outre elle passe par le point L', symétrique du point L, puisqu'il est reconnu que les limites

d'élasticité de traction et de compression sont sensiblement égales.

Si on trace les formes extrêmes des courbes qui satisfont à ces conditions, c'est-à-dire le rectangle et le trapèze rectiligne, on reconnaît que la distance de leurs centres de gravité à l'axe Oy ne varie qu'entre $3^{\text{mm}},0$ et $3^{\text{mm}},8$. On ne fera donc au plus qu'une erreur égale à $9\,473^{\text{k}},3 \times 0^{\text{m}},0004 = 3^{\text{km}},79$ en adoptant pour cette distance la valeur moyenne $3^{\text{mm}},4$, qui donne pour le moment résistant produit par les compressions

$$9\,473^{\text{k}},3 \times 0^{\text{m}},0034 = 32^{\text{km}},21.$$

En ajoutant la valeur ainsi trouvée pour le moment des pressions, soit $32^{\text{km}},21$ à la valeur précédemment déterminée du moment des tensions, c'est-à-dire à $53^{\text{km}},05$ on obtient en somme $85^{\text{km}},26$ pour valeur déterminée graphiquement du moment total de flexion développé dans le prisme d'acier carré de $16^{\text{mm}},5$ de côté, au moment où l'allongement de ses fibres extrêmes était égal à 39 p. 100.

Nous savons que l'expérience a donné $83^{\text{km}},84$ pour valeur réelle de ce moment de flexion ; la différence est inférieure à 2 p. 100.

Nous avons fait la même vérification pour le prisme carré de 39 millimètres, dont l'essai a été décrit au paragraphe 24, et nous avons trouvé graphiquement $736^{\text{km}},80$ pour la valeur du moment de flexion, tandis que l'expérience directe a donné $729^{\text{km}},70$. La différence entre ces chiffres est encore moindre que dans le cas précédent.

Cet accord très satisfaisant des valeurs réelles du moment de rupture et des valeurs obtenues par la construction graphique confirme l'exactitude des bases sur lesquelles elle repose, c'est-à-dire des relations que nous avons établies entre les propriétés qu'un même métal possède au point de vue de la traction et à celui de la flexion.

On peut au moyen d'une construction analogue déter-

miner la valeur à laquelle se serait élevé le moment de flexion du prisme de $16^{\text{mm}},5$ de côté, si on avait pu le mesurer au moment de la rupture. Nous l'avons fait et nous avons trouvé que le moment de rupture aurait été égal à 105 kilogrammètres, soit 2,43 fois plus que ne donne la formule $M = \frac{RI}{n}$ qui exprime la somme des moments des deux triangles ATr , ATc dont la hauteur est égale à R , résistance de traction.

30. *Valeurs des divers aciers au point de vue de la rupture par flexion.* — Les résultats auxquels nous venons d'arriver nous permettent d'expliquer les anomalies que l'on a reconnues dans la résistance des aciers à la flexion.

On sait en effet, et les Ingénieurs de Terrenoire en particulier, ont remarqué que, dans la série carburée, le rapport de la résistance de flexion à la résistance de traction est très élevé pour les aciers doux et très faible pour les aciers durs (*).

Ce fait inattendu s'explique naturellement par les chiffres du tableau inséré au paragraphe 17 qui montrent que la striction est extrêmement forte pour les aciers extra-doux et très faible pour les aciers carburés durs. Pour les premiers, l'allongement de striction A est voisin de 200 p. 100 ; la section contractée n'est par suite que le tiers de la section primitive, et la résistance de striction est plus que double de la résistance rapportée à la section primitive. La résistance à la flexion doit être relativement énorme pour un tel métal, puisqu'elle se règle sur la résistance de striction.

Au contraire, pour les aciers carburés à $70^{\text{k}},0$ de résistance, l'allongement de striction n'a plus que la valeur insignifiante de 9 p. 100 et la résistance de striction est par

(*) Ouvrages déjà cités de M. Deshayes.

suite très peu supérieure à la résistance usuelle. Un tel métal ne peut que résister fort mal à la flexion.

On a également constaté à l'usine de Terrenoire que l'infériorité des aciers durs par rapport aux aciers doux pour la résistance à la flexion est beaucoup moins marquée pour les métaux riches en manganèse que pour ceux dont la dureté est produite presque exclusivement par une forte teneur en carbone. Le tableau précité l'explique encore en montrant, qu'à l'égale dureté, les aciers riches en manganèse ont un allongement de striction de 5 à 7 fois plus considérable que les aciers simplement carburés de même résistance usuelle.

Pour les aciers phosphoreux, nous ne pouvons rien conclure, car M. Deshayes (*) dit avoir observé qu'ils prennent généralement moins de striction que les métaux carburés et manganésés, et ce serait le contraire qui résulterait des chiffres qu'il donne et dont deux sont reproduits au tableau précité. Nous avons eu peu d'occasions d'étudier les métaux phosphoreux, mais nous pensons que cette contradiction apparente s'explique par l'irrégularité de ces aciers, dont nous parlerons ultérieurement.

Nous ne connaissons aucun essai de rupture par flexion des aciers chromés, mais la valeur énorme de leur allongement de striction nous fait penser qu'ils doivent avoir une résistance à la rupture par flexion très exceptionnelle. Cette prévision est plus que probable, vu la difficulté extrême que l'on a à briser ces aciers au marteau, même après les avoir incisés à la tranche, tandis que, dans les mêmes conditions, les aciers carburés d'égale résistance se brisent au premier choc.

Il est peu probable que les aciers chromés prennent jamais une place importante dans les constructions; leur prix de revient est trop élevé et leur fabrication trop déli-

(*) Ouvrages déjà cités.

cate, mais il en est pas de même des aciers riches en manganèse dont l'emploi est commandé, lorsqu'on veut obtenir à la fois de la dureté et une grande résistance à la flexion. C'est le cas des rails. Jusqu'à présent les aciers durcis par le carbone et pauvres en manganèse n'ont pas permis de concilier ces deux exigences.

31. *Flèche et travail résistant de flexion.* — Un barreau travaillant par flexion prendra évidemment une flèche d'autant plus grande qu'il y aura plus d'allongement du métal dans ses sections déformées et en outre que la déformation s'étendra à une plus grande fraction de sa longueur totale.

En ce qui concerne l'allongement dans la section de rupture, nous avons déjà vu qu'il est égal à l'allongement de striction. Le premier facteur de la flèche augmente donc avec la striction. Voyons comment varie le second.

La figure 13 représentant un barreau de longueur entre

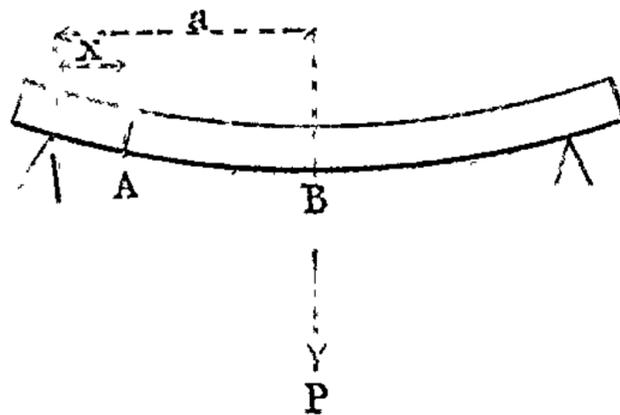


Fig. 13.

appuis égale à $2a$, et x étant l'abscisse du point où cesse la déformation, lorsque la section B va se rompre sous l'action de la charge P, le second facteur de la flèche est $(a-x)$ longueur de la partie déformée.

Si on appelle m et M les moments qui se produisent simultanément en A et B, on a $\frac{m}{M} = \frac{x}{a}$. D'autre part la

section A étant la limite de la partie déformée du barreau, la tension de ses fibres extrêmes est égale à la limite d'élasticité et la section B étant par hypothèse au moment de se rompre, la tension de ses fibres extrêmes est égale à la résistance de striction R^s . Or nous verrons aux paragraphes 37 et 38 qu'à partir de la limite d'élasticité les moments de flexion sont à $\frac{1}{10}$ près proportionnels aux tensions des fibres extrêmes. On a donc avec une approximation grossière, il est vrai, mais à peu près constante, ce qui suffit, pour la présente démonstration :

$$\frac{m}{\bar{M}} = \frac{L}{R^s} \text{ et par suite } \frac{x}{a} = \frac{L}{R^s} \text{ et}$$

$$\frac{a-x}{a} = \frac{R^s - L}{R^s} = 1 - \frac{L}{R^s}.$$

$(a-x)$ varie donc en sens inverse du rapport $\frac{L}{R^s}$ et dans des limites très étendues, car $\frac{L}{R^s}$ a des valeurs deux fois plus fortes environ pour les aciers durs que pour les aciers extradoux.

En résumant les variations de ses deux facteurs, on arrive donc à reconnaître que la flèche de rupture augmente en raison directe de la striction et en raison inverse du rapport de la limite d'élasticité à la résistance de striction.

32. *Travail de rupture par flexion.* — Le travail résistant est la somme des produits des accroissements successifs de la flèche par les charges correspondantes. Nous venons de voir que la flèche augmente avec la striction et en raison inverse de $\frac{L}{R^s}$ et nous avons reconnu précédemment que la résistance à la flexion augmente avec la résistance de striction. Donc, en résumé le travail résistant

de flexion augmente avec l'allongement de striction, avec la résistance de striction et en sens contraire du rapport de la limite d'élasticité à la résistance de striction.

33. *Différences caractéristiques de la flexion et de la traction.* — Les résultats que nous venons d'obtenir prouvent que la valeur d'un métal au point de vue de la flexion n'est nullement proportionnelle à sa valeur au point de vue de la traction.

Pour la résistance d'abord, nous avons vu que le rapport des efforts totaux que les aciers peuvent supporter par flexion et par traction varie de 2,43 au moins à 1,00, suivant que le métal est plus ou moins ductile.

En ce qui concerne la déformation, la différence est bien plus considérable encore. Ainsi par traction une barre de section uniforme et de très grande longueur ne s'allongera avant de se rompre que de ce que nous avons appelé l'allongement proportionnel, qui est de 15 à 25 p. 100 au plus pour les aciers extra doux, et qui ne descend guère au-dessous de 8 à 10 p. 100 pour les aciers de construction les plus durs, et même pour les aciers à rails. Le rapport des allongements que prennent par traction des barres de section uniforme et de grande longueur ne varie donc guère que dans le rapport de 1 à 3 au plus pour les aciers des nuances les plus différentes.

Dans la flexion au contraire nous avons établi que la déformation dépend surtout de l'allongement de striction qui peut varier de 6,8 ou 10 p. 100 à 200 p. 100; et en effet, l'expérience prouve que les déformations que les aciers extra-doux prennent dans la flexion sont 20, 25, 30 et parfois 40 fois plus fortes que celles qui accompagnent la rupture des aciers durs.

La différence est plus grande encore au point de vue du travail de rupture, car dans la traction il ne varie guère que du simple au double, lorsque des aciers durs on

passé aux aciers doux, tandis que, dans les mêmes conditions, il est multiplié par 30, 40 ou 50, s'il s'agit de la flexion.

Enfin dans la traction, le travail de rupture a une valeur d'autant plus forte que la limite d'élasticité est relativement plus élevée, et nous avons vu au paragraphe 32 que c'est précisément l'inverse pour la flexion.

On arriverait donc à des conséquences absolument inexactes, si, d'essais par traction, on déduisait la valeur d'un métal pour la flexion ou inversement, sans tenir compte des considérations qui précèdent.

Les essais au choc, notamment, que l'on exécute presque toujours par flexion, peuvent conduire à des conclusions erronées au point de vue de la traction ; elles mettent en effet en évidence une supériorité énorme des aciers extra-doux, au point de vue de la résistance aux effets dynamiques, et on irait au-devant de graves mécomptes, si on espérait la retrouver dans les organes travaillant par traction directe. L'expérience le confirme et dans le chapitre que nous consacrerons à l'étude des effets dynamiques, on verra par exemple qu'un acier ayant 50 kilogrammes environ de résistance n'a pas sensiblement mieux résisté aux chocs agissant par traction directe qu'un acier mi-dur ayant 70 kilogrammes de résistance. Il en aurait été tout autrement par flexion.

Nous reviendrons sur cette considération lorsque nous chercherons à déterminer la qualité d'acier qui convient le mieux aux grandes constructions, où le métal travaille généralement par traction ou par compression simple.

La supériorité que le fer et l'acier possèdent au point de vue de la rupture par flexion conduirait forcément à admettre pour les pièces fléchies des efforts très supérieurs à ceux que l'on impose aux pièces qui travaillent par traction simple, si l'on pensait, avec certains Ingénieurs, que c'est sur la résistance à la rupture que doit être réglé l'ef-

fort pratique du métal. Avant de conclure nous allons étudier la flexion à deux autres points de vue : la limite d'élasticité et la résistance aux efforts répétés.

34. *Limite d'élasticité de flexion.* — Nous avons vu que, même au-dessous de la limite d'élasticité usuelle, le métal travaillant par traction simple a une élasticité imparfaite et prend des allongements qui croissent plus vite que les tensions. La courbe de déformation par traction présente donc une convexité sensible, même pour de faibles efforts, et il en résulte que la formule $M = \frac{TI}{n}$ n'est pas absolument exacte dans les limites où on la considère comme telle, et que le moment limite d'élasticité de flexion qui est le moment de l'aire d'un triangle curviligne convexe, dont l'ordonnée maximum est égale à la limite d'élasticité de traction L , est supérieur à la valeur théorique $\frac{LI}{n}$.

On n'arriverait qu'à des conclusions sans autorité en cherchant à calculer l'erreur de la formule théorique d'après la valeur de la convexité de la courbe de déformation, qui est trop faible au-dessous de la limite d'élasticité pour être mesurée avec une précision parfaite. Nous ne ferons appel qu'à l'expérience directe.

Plusieurs expérimentateurs ont reconnu que la limite d'élasticité de flexion des aciers est relativement plus élevée que leur limite d'élasticité de traction. M. Deshayes en parle dans ses ouvrages déjà cités, mais sans donner de chiffres précis. M. Weyrauch mentionne des essais exécutés par M. Bauschinger, desquels il résulte que la limite d'élasticité de flexion L^f dépasse la limite d'élasticité de traction L d'une quantité plus faible que celle dont la résistance à la rupture par flexion R^f dépasse la résistance à la rupture par traction R , mais qui lui est sensiblement proportionnelle.

Ainsi pour les aciers doux qui donnent $\frac{R^f}{R} = 1,78$, M. Bauschinger a trouvé $\frac{L^f}{L} = 1,27$, l'indice f indiquant les éléments relatifs à la flexion.

Pour les aciers durs, il a obtenu sensiblement $\frac{R^f}{R} = 1,00$ et $\frac{L^f}{L} = 1,00$.

Toutefois ces essais laissent place à des doutes, parce que la limite d'élasticité, n'étant pas une quantité susceptible d'être mesurée rigoureusement, peut n'être pas appréciée de la même manière par des observateurs différents. En outre les essais de flexion ont été généralement, si non toujours, faits en chargeant d'un poids unique le milieu d'une barre. Or, si cette manière d'opérer n'a aucun inconvénient au point de vue de l'étude de la rupture, pour laquelle nous l'avons employée nous-même, il n'en est pas ainsi pour les essais d'élasticité; car elle ne réalise le moment maximum qu'en un seul point, ou tout au moins dans une très faible portion de la longueur de la barre située en son milieu. L'instant où la limite d'élasticité y est atteinte est donc impossible à discerner exactement, puisque la déformation permanente qui se produit sur une très faible longueur ne peut modifier que d'une manière imperceptible la flèche élastique qui est la résultante des déformations de toute la longueur du barreau.

Pour faire disparaître cette dernière cause d'erreur, nous avons fait de nouveaux essais en mesurant les flèches de barreaux soumis, non plus à une charge unique, mais à un moment constant de flexion dans toute la longueur observée. Quant à l'incertitude de la mesure de la limite d'élasticité, elle disparaîtra par l'étude des courbes complètes de déformation construites au moyen des éléments fournis par ces essais.

35. *Essai d'élasticité d'un barreau d'acier carré de 16^{mm},5.* — Un barreau de 1^m,200 de longueur a été pris dans la barre d'acier dont le tableau n° 1 annexé à cette note reproduit l'essai de traction, et dont l'essai de flexion à outrance a été décrit au paragraphe 25.

Ce barreau a été posé sur deux appuis espacés de 1^m,078 et deux rainures transversales de 1 millimètre environ de profondeur ont été faites à la lime triangulaire sur sa face supérieure à 300 millimètres de part et d'autre de son milieu.

Des bouts de fil de fer de 2 millimètres de diamètre ont été placés dans ces rainures, où ils ont pris une position invariable. Sur leurs génératrices supérieures qui devenaient des points fixes par rapport au barreau, on a posé une règle en fer percée en son milieu d'un trou taraudé, dans lequel passait une vis micrométrique permettant de mesurer les flèches à $\frac{1}{100}$ de millimètre près.

La vis a été amenée au contact du barreau, et on a ainsi obtenu le point de départ du mesurage des flèches.

On a ensuite suspendu au barreau, à 294 millimètres de distance de chaque point d'appui un plateau pesant exactement 50 kilogrammes et on a mesuré la flèche que le barreau a pris sous le poids de ces deux plateaux. Puis on a ajouté successivement des poids de 5 kilogrammes dans chaque plateau et on a mesuré la flèche prise par le barreau après chaque addition de poids.

Le tableau ci-contre donne le résultat des essais.

POIDS de chaque plateau. P	MOMENTS DE FLEXION correspondants $M = P \times 0,294$	TENSIONS DES FIBRES extrêmes calculées par la formule $T = \frac{Mh}{I} = M \times 1,34$	FLÈCHES	ALLONGEMENTS des fibres extrêmes 0,16 f.
kil.	km.	kil.	mm.	mm.
50	14,70	19,70	5,74	0,92
55	16,17	21,67	6,29	1,01
60	17,64	23,64	6,92	1,11
65	19,11	25,61	7,44	1,18
70	20,58	27,58	8,07	1,29
75	22,05	29,55	8,55	1,37
80	23,52	31,72	9,16	1,47
85	24,99	34,49	8,75	1,56
90	26,46	35,46	10,37	1,66
95	27,93	37,43	10,95	1,75
100	29,40	39,40	11,75	1,88
105	30,87	41,37	13,02	2,08
110	32,34	43,34	13,94	2,23
115	33,81	45,31	15,30	2,45
120	35,28	47,28	17,32	2,77
125	36,75	49,25	19,29	3,09
130	38,22	51,21	22,84	3,65
135	39,69	53,18	38,04	6,09

Nous avons représenté graphiquement sur une même épure les résultats fournis par ces chiffres et ceux de l'essai de traction du même métal qui sont inscrits dans le tableau annexe n° 1, afin de rendre sensible aux yeux les différences et les rapports des lois qui régissent la déformation dans la traction et dans la flexion. (fig. 3, Pl. XIV).

OLT (épure B, fig. 3) représente la courbe de déformation réelle par traction ayant pour abscisses les allongements p. 100 mesurés dans les sections contractées et pour ordonnées les tensions réelles dans ces mêmes sections. L'échelle des abscisses est d'un demi-millimètre pour 1 p. 100 d'allongement de celle des ordonnées d'un demi-millimètre par kilogramme de tension.

L'échelle des abscisses de l'épure B étant trop petite pour que la partie de courbe située au-dessous de la limite d'élasticité pût être distinguée de l'axe *oy*, nous avons représenté dans l'épure A de la même figure cette portion de courbe avec la même échelle des ordonnées et avec une échelle des abscisses 100 fois plus grande.

OL⁴U représente la courbe de déformation par flexion construite de la manière suivante.

Nous avons pris pour abscisses les allongements des fibres extrêmes représentés à la même échelle que dans les courbes de traction. Leurs valeurs nous ont été données directement par l'expérience, pour les essais à outrance décrits au paragraphe 25, la déformation ayant allongé les fibres extrêmes de quantités assez fortes pour être mesurées exactement. Mais il n'en est pas de même des essais d'élasticité dont nous venons de rendre compte et dans lesquels, n'ayant pas encore songé au moyen de mesure directe que nous décrirons au paragraphe 45 nous n'avons constaté que les flèches. Toutefois, au moyen des valeurs trouvées pour ces flèches, nous avons pu calculer de la manière suivante les allongements correspondants, qui leur sont sensiblement proportionnels, tant que les déformations sont peu considérables, comme c'est le cas dans les essais d'élasticité de fer et d'acier.

Il résulte des chiffres du tableau ci-dessus que, jusqu'à la charge de 70 kilogrammes par plateau, l'augmentation de flèche du barreau a été régulière et égale à 0^{mm},115 par kilogramme ajouté. D'autre part chaque kilogramme placé sur les plateaux à 0^m,294 des points d'appui développe un moment égal à 0^{km},294 correspondant à $\frac{0,294n}{1} = \frac{0,294}{0,748}$ kilogrammes de tension des fibres extrêmes, et produit par conséquent un allongement de ces fibres que nous savons être sensiblement égal à $\frac{0,294}{0,748} \times 0^{\text{mm}},046$ (*), tant que l'on reste dans les limites de l'élasticité parfaite. Une augmentation de flèche de 0^{mm},115 correspond donc à un allongement des fibres extrêmes de $\frac{0,294}{0,748} \times 0^{\text{mm}},046$; et par

(*) Voir paragraphe 5.

suite, pour tracer au moyen des flèches une courbe dont les abscisses représentent les allongements des fibres extrêmes, il suffit de multiplier les valeurs des flèches par

$$\frac{0,294 \times 0,046}{0,748 \times 0,115} = 0,16.$$

En d'autres termes, 1 millimètre de flèche correspond à $0^{\text{mm}},16$ d'allongement des fibres extrêmes, et il est facile au moyen de ce rapport de passer de l'un à l'autre de ces éléments et de représenter les abscisses de la courbe de flexion à la même échelle que celles de la courbe de traction

Pour les ordonnées il n'en est pas de même, ce sont des tensions d'une part, des moments de l'autre, et on ne peut adopter la même échelle pour des quantités d'ordre différent.

Tant qu'on reste dans la période d'élasticité parfaite, on a $T = \frac{Mn}{I}$ et pour le prisme carré de $16^{\text{mm}},5$ dont il s'agit,

cette formule devient $T = \frac{M}{0,748} = 1,34 M$. Les tensions

calculées des fibres extrêmes sont donc 1,34 fois plus fortes que les moments correspondants; par suite, si on porte les moments de flexion du barreau en ordonnées à l'échelle de $\frac{1^{\text{mm}},34}{2}$ par kilogrammètre, ces ordonnées représen-

ront les tensions calculées correspondantes des fibres extrêmes, à l'échelle d'un demi-millimètre par kilogramme, qui est précisément l'échelle des ordonnées de la courbe de traction.

Si on adopte ces échelles, la courbe de flexion coïncidera donc avec la courbe de traction tant que l'élasticité sera parfaite et que par suite la formule $T = \frac{Mn}{I}$ sera applicable.

Au-delà les deux courbes se sépareront.

En conséquence la courbe de flexion a été tracée en prenant pour abscisses les allongements des fibres extrêmes

figurés à la même échelle que dans la courbe de traction, et ses ordonnées représentent les moments de flexion à l'échelle de $\frac{1^{\text{mm}},34}{2}$ par kilogrammètre, ou encore les tensions des fibres extrêmes calculées par la formule $T = \frac{Mz}{I}$ et figurées à l'échelle d'un demi-millimètre par kilogramme, qui est celle des tensions dans la courbe de traction.

On a indiqué par des croix les points des courbes qui ont été déterminés expérimentalement, et on remarquera qu'il y a des lacunes au-dessous de la limite d'élasticité (épure A) dans la courbe de traction, et entre la limite d'élasticité et l'abscisse de 20 p. 100 dans la courbe de flexion (épure B). Pour la première, ces lacunes viennent, comme nous l'avons dit, de l'impossibilité où l'on a été de mesurer avec précision les très petits allongements des barreaux de faible longueur que l'on a essayés par traction. A défaut de points certains, nous avons donné à la partie de courbe située en deçà du point M qui est connu, une forme analogue à celle qui résulte des allongements constatés par Hodgkinson pour une barre de 15 mètres de longueur.

Quant à la lacune qui existe dans la courbe de flexion (épure B) entre les points L' et H, elle n'aura aucune influence sur nos conclusions.

36. L'examen de l'épure A, figure 3, fait voir que la courbe de flexion, comme la courbe de traction, coïncide près de l'origine avec la droite OK qui représente les allongements élastiques et dont l'équation est $\frac{x}{y} = 0,000046$. C'est la conséquence du choix des échelles.

Vu la constance de l'allongement élastique constatée au paragraphe 5, nous savons déjà qu'en ce qui concerne la trac-

tion, l'allongement permanent subi par le métal sous l'action d'un effort déterminé est précisément égal à la différence des abcisses de la courbe et de la droite OK qui correspondent à l'ordonnée représentant cet effort.

Dans une expérience que nous avons faite pour rechercher si cette loi constatée pour la traction était exacte pour la flexion, nous avons obtenu les résultats suivants :

Un barreau découpé dans la barre d'acier carrée de $16^{\text{mm}},5$ dont nous nous occupons, a été placé sur deux appuis espacés de $1^{\text{m}},00$ et chargé en son milieu de poids croissants. Tant que la charge n'a pas dépassé 90 kilogrammes l'augmentation de flèche produite par chaque addition d'un kilogramme a été très sensiblement régulière et égale à $0^{\text{mm}},164$. A partir de cette charge, l'accroissement de flèche est devenu plus rapide, mais en déchargeant le barreau, on a constaté que la diminution de flèche produite par chaque suppression d'un kilogramme sur le plateau était à très peu près régulière et égale à $0^{\text{mm}},170$. Ces deux nombres diffèrent assez peu pour qu'on puisse dire que le coefficient de l'élasticité qui se manifeste quand on décharge un barreau fléchi est constant, quelle que soit la charge qu'il a supportée, et qu'il est égal au coefficient de l'élasticité qui se manifeste lorsqu'on charge le même barreau dans les limites de l'élasticité à peu près parfaite.

En un mot, pour le fer et l'acier, le coefficient d'élasticité est constant dans la flexion comme dans la traction.

Graphiquement, il en résulte que les raccourcissements ou allongements élastiques sont donnés pour toute valeur du moment de flexion par les abcisses correspondantes de la droite OK, c'est-à-dire de la tangente à la courbe de flexion passant par l'origine des coordonnées.

Le moment de flexion dD' produit donc un allongement total KD' qui se compose d'un allongement élastique Kq et d'un allongement permanent qD' , exactement comme la tension dD agissant par traction simple produit un allon-

gement total jD qui se compose d'un allongement élastique j^r et d'un allongement permanent rD .

Avant de rechercher au moyen de ces résultats les valeurs de la limite d'élasticité pour la flexion et pour la traction, nous allons indiquer deux propriétés que possèdent les courbes de déformation et dont la connaissance nous aidera à faire cette détermination.

Nous avons vu au paragraphe 29 que les tensions développées dans la partie de section d'un prisme fléchi qui travaille par traction, lorsque ses ordonnées extrêmes ont une tension égale à dD sont représentées par les ordonnées de la portion de courbe OLD, l'abscisse Od étant considérée comme représentant la hauteur de cette partie de section, et que le moment réel de flexion produit par ces tensions est égal au moment du trapèze curviligne OLD d pris par rapport à Oy , tandis que le moment calculé par la formule $M = \frac{TI}{n}$ est égal au moment du triangle OD d .

Nous avons vu d'autre part au paragraphe 35, que le moment calculé, correspondant à la tension des fibres extrêmes T , est égal pour le prisme considéré à $\frac{T}{1,34}$ et que par suite il est représenté par la même ordonnée que T , pourvu que l'échelle des moments soit 1,34 fois plus forte que celle des tensions, comme cela a lieu dans nos épures. Les ordonnées de la courbe de traction représentent donc les valeurs calculées des moments de flexion à l'échelle de $\frac{1^{mm},34}{2}$ par kilogrammètre, pendant que les ordonnées correspondantes de la courbe de flexion représentent les valeurs réelles de ces moments à la même échelle. Du rapprochement de ces deux faits, il résulte que, lorsque le moment total de flexion est égal au double du moment produit par les tensions, comme c'est le cas lorsque le déplacement de l'axe neutre est nul ou négligeable, on a d'une part

$$\frac{\text{Moment, trapèze curviligne } OLDd}{\text{Moment, triangle } ODd} = \frac{\text{Moment de flexion réel}}{\text{Moment de flexion calculé}}$$

et d'autre part :

$$\frac{dD'}{dD} = \frac{\text{Moment de flexion réel}}{\text{Moment de flexion calculé}}$$

L'égalité des seconds termes entraîne celle des premiers d'où résulte la propriété suivante :

« Tant que le déplacement de l'axe neutre est négligeable, le rapport des ordonnées qui correspondent à une même abscisse dans les courbes de flexion et de traction est égal au rapport des moments pris par rapport à oy du trapèze curviligne et du triangle ayant pour base cette abscisse et pour hauteur l'ordonnée correspondante de la courbe de traction. »

On peut se rendre compte que ce fait se vérifie d'une manière satisfaisante dans le voisinage de la limite d'élasticité pour les courbes que nous avons tracées dans la figure 3 ; d'où il faut conclure que pour l'acier auxquelles elles se rapportent l'axe neutre n'est pas sensiblement déplacé dans cette limite.

Lorsque les efforts dépassent de beaucoup la limite d'élasticité, ces deux rapports cessent d'être égaux et leur inégalité représente l'effet du déplacement de l'axe neutre.

37. *Retour d'un prisme fléchi à l'équilibre.* — Après avoir étudié ce qui se passe dans un prisme qu'on charge par flexion, nous allons analyser les faits qui se produisent, si on vient à le décharger.

Supposons que le prisme soit soustrait à tout effort extérieur après avoir pris la flexion que nous venons d'étudier, et qui est caractérisée par une tension des fibres extrêmes égale à dD et par un allongement de ces fibres égal à Od .

Par suite de la conservation des sections planes, les fibres allongées se raccourciront forcément de quantités propor-

tionnelles à leurs distances au point O , trace de l'axe neutre ; et leurs tensions diminueront de quantités proportionnelles à ces raccourcissements, c'est-à-dire à ces mêmes distances au point O , puisque nous avons vu que le coefficient d'élasticité reste constant, quelle que soit la tension que le métal a subie. Les tensions qui existeront dans la demi-section considérée du prisme soustrait à tout effort extérieur seront donc égales aux ordonnées de la courbe OLD diminuées de quantités proportionnelles à leurs distances au point O , c'est-à-dire qu'elles seront égales aux ordonnées de la courbe OLD prises, non plus par rapport à Ox , mais par rapport à une ligne inclinée passant par le point O .

Mais, puisqu'il n'y a plus de forces extérieures, le moment total produit par les forces intérieures doit être nul. Le moment partiel produit dans la demi-section qui travaillait précédemment par traction doit lui-même être nul, tant que l'axe neutre ne se déplace pas, car il y a alors symétrie par rapport à lui entre les efforts développés dans les deux demi-sections du prisme. Pour que ce moment partiel soit nul, il faut que, dans la demi-section considérée, il se développe des pressions contre-balançant les tensions qui subsistent, et que de même, dans la demi-section précédemment comprimée, il se développe des tensions contre-balançant les pressions qui subsistent.

Graphiquement, il faut donc que la ligne, à partir de laquelle on mesure les ordonnées de la courbe OLD, la coupe en un point E , tel que le moment des pressions représentées par la surface EDD'' soit égal au moment des tensions représentées par la surface OQE. La position de la ligne OD'' est donc déterminée par la condition que l'on ait par rapport à l'axe Oy :

$$\text{Moment OQE} = \text{Moment EDD}''.$$

La tension dD des fibres extrêmes sera donc remplacée par une pression DD'' . Algébriquement, elle aura varié de dD'' et par suite les fibres extrêmes auront pris un rac-

courcissement proportionnel à dD'' , en vertu de la constance du coefficient d'élasticité dans la flexion.

S'il s'agissait d'un barreau travaillant par traction simple à la tension dD , le raccourcissement de ses fibres aurait été évidemment proportionnel à la tension dD ; c'est la conséquence immédiate de la constance du coefficient d'élasticité de tension.

Donc, dans le prisme fléchi, lorsque les forces extérieures cessent d'agir, après y avoir fait naître des efforts assez faibles pour ne pas déplacer l'axe neutre, les fibres extrêmes prennent un raccourcissement $\frac{dD''}{dD}$ fois plus fort que celui que prendraient des fibres soumises par traction simple à un effort d'égale intensité. Le raccourcissement élastique qui correspond dans la traction simple à la tension dD étant égal à jr , il en résulte que le raccourcissement élastique des fibres extrêmes du prisme fléchi qui ont subi la même tension dD est égale à $jr \times \frac{dD''}{dD}$; il a donc la valeur mn , car la similitude des triangles donne la relation $\frac{mn}{jr} = \frac{dD''}{dD}$.

Mais d'autre part $OL'N$ étant la courbe réelle de flexion correspondant à la courbe de traction OLM , telle qu'elle a été donnée par l'expérience, on voit que, lorsque les fibres extrêmes du prisme ont pris la tension dD , le moment de flexion était égale à dD' et l'allongement élastique de flexion égale à Kq . Comme nous venons de prouver que ce même allongement élastique est égal à mn , il faut que l'on ait $mn = Kq$, ce qui n'est possible que si D'' se confond avec D' .

Les deux courbes de flexion et de traction tracées avec les échelles que nous avons choisies jouissent donc de la seconde propriété énoncée ci-dessous, tant que l'axe neutre ne se déplace pas.

« Si on joint l'origine à un point D' de la courbe de flexion, la ligne ainsi tracée détermine avec l'ordonnée correspondante et la courbe de traction deux triangles curvilignes DED' et OQE dont les moments sont égaux par rapport à l'axe Oy ; et les portions d'ordonnées comprises entre cette ligne et la courbe de traction représentent les tensions et les pressions qui subsistent dans la demi-section étendue du prisme, lorsqu'il est abandonné à lui-même, après avoir subi un moment de flexion égal à dD' . »

On arrive donc à reconnaître, qu'à l'encontre de ce qui se passe dans la traction, où les forces intérieures disparaissent avec l'effort extérieur qui les a fait naître, les fibres d'un prisme qui a subi une déformation permanente par flexion ne peuvent jamais revenir au repos absolu. Si on supprime l'effort, leurs tensions et pressions intérieures se font équilibre, mais elles ne s'annulent pas.

La variation algébrique des tensions des fibres extrêmes étant, comme nous l'avons vu plus haut, égale à dD' , il en résulte que, lorsqu'un prisme est successivement soumis à un moment de flexion dD' qui dépasse la limite d'élasticité absolue, puis soustrait à son action, la tension des fibres extrêmes atteint un maximum positif dD qui n'est pas proportionnel à la valeur du moment, mais elle prend ensuite une valeur négative DD' qui est telle que la variation algébrique totale dD' de la tension est proportionnelle au moment de flexion et égale à la valeur donnée par la formule théorique $T = \frac{Mn}{I}$.

Il est facile de démontrer directement ce dernier fait, ou plutôt il est évident, car les allongements et raccourcissements devenant rigoureusement proportionnels aux tensions et pressions quand le métal est abandonné à lui-même après avoir subi une déformation, il est clair que la formule qui est basée précisément sur cette proportionnalité

doit s'appliquer exactement aux variations d'efforts correspondants.

On comprend maintenant la cause de ce fait, que nous avons constaté plus haut sans commentaire, mais qui paraît d'abord surprenant, qu'à une égale valeur de l'allongement total correspondent dans la flexion et dans la traction des valeurs différentes de l'allongement permanent, ainsi que le prouve l'examen de la figure 3.

Toutefois la diminution de l'allongement permanent des fibres extrêmes dans la flexion n'est pas produite par l'énergie propre de ces fibres, mais par celle des fibres intérieures dont elles sont solidaires. En fait même l'allongement permanent de ces fibres n'est pas réellement diminué, il est masqué, empêché par les fibres voisines, et il se produirait en totalité, si on détruisait cette solidarité.

L'allongement permanent est donc artificiellement réduit dans la flexion; ce n'est pas lui, mais l'allongement total qui donne la mesure de l'altération qu'a subie l'élasticité. Par suite, les valeurs réellement corrélatives des limites d'élasticité de flexion et de traction doivent correspondre à une même valeur de l'allongement total et non de l'allongement permanent. Graphiquement, elles correspondent donc à des points des courbes ayant même abscisse et non à des points situés sur une même parallèle à la droite OK, comme ce serait le cas, si on prenait pour *critérium* l'égalité de l'allongement permanent.

Il reste à savoir quelle valeur de l'abscisse, c'est-à-dire, de l'allongement total il convient d'adopter comme définissant la limite d'élasticité.

Il semble naturel de tenir compte pour la choisir de ce qui se passe dans les usines et dans les arsenaux, où on fait tous les jours un nombre considérable d'essais pour contrôler la qualité des matières fournies. Or, on y mesure les allongements entre deux repères écartés de 200 millimètres et nous croyons pouvoir affirmer qu'on ne saurait,

avec les moyens généralement employés, observer moins de 2 à 3 dixièmes de millimètre, ce qui correspond à 1 millimètre ou $1^{\text{mm}},5$ par mètre, c'est-à-dire à la valeur de l'allongement élastique dans le voisinage de la limite d'élasticité. Il en résulte qu'un bon observateur reconnaîtra en général l'existence de l'allongement permanent, lorsqu'il sera égal à l'allongement élastique, c'est-à-dire lorsque l'allongement total sera double de l'allongement élastique.

Adoptant cette base, nous admettrons que les limites d'élasticité de traction et de flexion sont les ordonnées des deux courbes qui correspondent à un allongement total de traction double de l'allongement élastique. Pour l'acier, dont les courbes sont représentées dans la figure 3, la limite d'élasticité de traction aura la valeur $lL = L$ et le moment limite d'élasticité de flexion aura la valeur $lL^f = L^f$. Nous avons vu plus haut qu'avec les échelles adoptées les moments qui correspondent, d'après la formule $M = \frac{TI}{n}$, aux tensions des fibres extrêmes sont représentés par les mêmes ordonnées qu'elles, vu le choix des échelles adoptées; nous devons donc conclure que le moment limite d'élasticité de flexion L^f , n'est nullement égal à la valeur $\frac{LI}{n}$ qui correspond à la limite d'élasticité de la traction,

mais est $\frac{lL^f}{lL} = 1,37$ fois plus fort qu'elle environ.

En langage moins correct mais plus simple, et en supposant que les tensions des pièces fléchies soient toujours calculées par la formule $M = \frac{TI}{n}$, on peut dire :

« La limite d'élasticité de flexion de l'acier, qualité construction, auquel se rapporte la figure 3, est 1,37 fois plus forte environ que sa limite d'élasticité de traction ».

Il est du reste évident que, si on adoptait une valeur moindre de l'allongement total, comme définissant l'alté-

ration de l'élasticité, on trouverait un rapport plus faible pour les deux limites. Il tomberait par exemple à 1,25 pour un allongement total égal aux $\frac{3}{2}$ de l'allongement élastique, et à 1,00 pour un allongement total infiniment voisin de l'allongement élastique. Au contraire il s'élèverait à 1,42 pour un allongement total triple de l'allongement élastique.

En présence de ces variations, il est possible de contester au point de vue théorique la valeur de $\frac{L^f}{L} = 1,37$ environ que nous avons adoptée; aussi, pour prévenir la discussion que l'on peut engager sur la valeur des mots, nous abandonnerons finalement toute définition théorique précise dans cette matière qui n'en comporte pas, et nous nous bornerons à l'énoncé de ce fait qui ne peut être contesté :

« Le moment de flexion qui produit une déformation notable méritant d'être prise en considération par les constructeurs est 1,35, à 1,40 fois plus fort que la valeur correspondant à la tension qui produit des déformations égales en agissant par traction simple. »

On remarquera que l'incertitude qui existe sur la véritable forme de la courbe de traction entre 0 et le point M déterminé expérimentalement n'est pas un motif de contester notre conclusion, car l'ordonnée du point L est sensiblement égale à celle du point M, ce qui est évidemment le maximum possible.

La correction qui résulterait d'une vérification expérimentale ne pourrait donc qu'abaisser le point L et augmenter encore le rapport $\frac{L^f}{L}$.

38. Coefficient d'erreur de la formule de flexion. —

Nous avons déjà dit que, si la formule $M = \frac{TI}{n}$ était exacte,

la courbe de flexion se confondrait avec la courbe de traction. Le rapport des ordonnées ayant même abscisse dans les deux courbes et mesurées avec une échelle commune donne donc le rapport du moment réel de flexion au moment calculé, rapport que nous appellerons coefficient d'erreur de la formule théorique $M = \frac{TI}{n}$.

Il résulte de l'étude des courbes que pour les abscisses 1,06 p. 100, 20,00 p. 100 et 39,00 p. 100 pour lesquelles les ordonnées sont connues par les résultats des expériences, ce coefficient d'erreur a les trois valeurs 1,50 — 1,49 et 1,46. Ces chiffres démontrent que la formule est aussi loin au moins de la vérité pour des tensions peu supérieures à la limite d'élasticité que pour des efforts plus considérables. *A priori* on aurait été tenté d'admettre au contraire que la formule théorique, exacte dans les limites de l'élasticité absolue, s'écarte d'autant plus de la vérité que les déformations deviennent plus considérables. L'étude des courbes fait comprendre les causes du fait contraire, qui est établi par l'expérience.

Le trapèze curviligne, dont le moment par rapport à *oy* représente le moment réel de flexion produit par les tensions dans le prisme fléchi, s'écarte d'autant plus du triangle théorique que ses deux hauteurs sont plus près d'être égales entre elles. Or sa petite hauteur est constante et égale à *L*; par suite, plus sa grande hauteur croît avec la tension des fibres extrêmes qu'elle représente, moins l'aire et le moment du trapèze dépassent l'aire et le moment du triangle théorique.

L'influence de la forme convexe de la courbe de déformation décroît donc à mesure que la flexion augmente et, si le coefficient d'erreur de la formule ne diminue pas plus rapidement avec elle, c'est que, outre les effets de la convexité de la courbe, il représente ceux du déplacement de

l'axe neutre qui augmente avec la déformation jusqu'à la rupture.

En résumé pour l'acier auquel se rapporte ce qui précède, le moment réel de flexion est donné en fonction de la tension réelle des fibres extrêmes, ou inversement, par les formules $M = K \frac{TI}{n}$, ou $T = \frac{1}{K} \frac{Mn}{I}$, dans laquelle K a une valeur qui est voisine de 1,37 près de la limite d'élasticité, qui s'élève ensuite très rapidement à 1,50 et qui descend graduellement pour les charges plus fortes jusqu'à 1,30, valeur qu'il paraît atteindre à l'instant de la rupture.

Le moment de rupture M^r serait donc égal à $1,30 \frac{R^s I}{n}$.

Si on voulait selon l'usage l'exprimer en fonction de la résistance rapportée à la section primitive R , ce qui n'est pas logique, on aurait $M^r = 2,43 \frac{RI}{n}$, comme nous l'avons déjà vu au paragraphe 29.

39. *Essai d'élasticité d'un barreau de fer carré.* — Nous avons fait un essai identique au précédent sur un barreau découpé dans la barre de fer dont le tableau annexe n° 2 donne les essais de traction et dont les essais de rupture par flexion ont été décrits au paragraphe 26. Malheureusement un choc donné au barreau a forcé d'interrompre l'expérience au moment où la charge des plateaux n'était encore que de 110 kilogrammes, et où les déformations n'avaient pas commencé à croître rapidement. On sait d'autre part que l'essai de ce fer par traction n'a pu être terminé, un défaut local ayant produit une rupture prématurée avant la striction.

Le tableau ci-contre donne les résultats de l'essai de flexion, qui sont intéressants quoique incomplets, et la figure 4 représente la courbe réelle de traction et la courbe de flexion.

POIDS de chaque plateau P	MOMENTS DE FLEXION correspondants $M = P \times 0,270$	TENSIONS DES FIBRES extrêmes calculées par la formule $T = \frac{Mz}{I} = 1,51 M$	FLÈCHES f	ALLONGEMENTS des fibres extrêmes $0,16 f$
0 kil.	0 km.	0 kil.	0 mm.	0 mm.
30	7,80	11,70	3,80	0,61
35	9,10	13,65	4,38	0,70
40	10,40	15,60	4,99	0,80
45	11,70	17,55	5,60	0,90
50	13,00	19,50	6,19	0,99
55	14,30	21,45	6,96	1,11
60	15,60	23,40	7,61	1,22
65	16,90	25,35	8,23	1,32
70	18,20	27,30	8,92	1,43
75	19,50	29,25	9,61	1,54
80	20,80	31,20	10,15	1,62
85	22,10	33,15	10,86	1,74
90	23,40	35,10	11,90	1,9
95	24,70	37,05	13,92	2,22
100	26,00	39,00	14,64	2,34
105	27,30	40,95	16,51	2,64
110	28,60	42,90	20,17	3,23

L'épure faite au moyen de ces chiffres montre que pour le fer en question, la limite d'élasticité est moins nette que pour l'acier étudié au paragraphe précédent. Suivant que l'on admettra une valeur plus ou moins grande de la déformation permanente comme définissant pratiquement le point où cesse l'élasticité à peu près parfaite, on trouvera des valeurs variant de 1,30 à 1,50 pour le rapport des limites d'élasticité de flexion et de traction. Nous adopterons la valeur 1,46 qui correspond à un allongement total égal au double de l'allongement élastique.

On remarquera que les deux propriétés qu'au paragraphe 38 nous avons reconnu appartenir aux courbes corrélatives de flexion et de traction, tant que l'axe neutre ne se déplace pas, ne se vérifient pas parfaitement pour le fer essayé. Il faut donc croire que pour ce métal l'axe neutre se déplace dans la flexion dès que l'élasticité cesse d'être parfaite, et cela semble impliquer, que contrairement aux idées reçues, la limite d'élasticité du fer est plus élevée dans la compression que dans la traction. C'est un point à vérifier.

Pour l'acier essayé au contraire les deux propriétés en question se vérifient presque parfaitement pour les courbes de déformation.

40. *Limites d'élasticité des métaux essayés.* — Nous résumons le résultat de nos essais d'élasticité en disant que, pour le fer et l'acier de qualité construction que nous avons essayés, le moment limite d'élasticité de flexion a été reconnu supérieur de plus d'un tiers à la valeur $\frac{LI}{n}$ qui correspond à la limite d'élasticité de traction, d'après la formule généralement employée.

Nous n'avons fait aucun essai pour les aciers très résistants et non ductiles qui n'offrent pas d'intérêt au point de vue des grandes constructions, mais on sait par les essais de M. Bauschinger, cités au paragraphe 23, que ces métaux ne présentent aucune supériorité au point de vue de la flexion, pas plus pour la limite d'élasticité que pour la résistance à la rupture.

On a sans doute remarqué que les aciers que nous avons essayés ont donné des résistances par flexion très supérieures à celles que M. Bauschinger a constatées pour des métaux de même résistance. D'après le résultat des études dont nous venons de rendre compte, il n'est pas douteux que cette discordance vienne de ce que nos aciers étaient plus manganésés que ceux de M. Bauschinger, et en effet l'acier qui nous a donné 57^k,8 de résistance renfermait 0,30 p. 100 seulement de carbone avec 0,72 p. 100 de manganèse, tandis que l'acier qui a donné 56^k,50 de résistance à M. Bauschinger renfermait 0,55 p. 100 de carbone et par suite était forcément très pauvre en manganèse. Ce fait confirme ce que nous avons déjà dit de la propriété qui permet aux aciers riches en manganèse d'acquérir de la résistance à la traction, tout en conser-

vant une grande ductilité et des qualités précieuses au point de vue de la flexion.

41. *Résistance aux efforts répétés.* — Nous avons comparé la flexion à la traction sous le rapport de la charge de rupture et de la limite d'élasticité ; il reste à étudier en troisième point de vue, dont l'importance a été mise en lumière par les remarquables expériences de MM. Woehler et Spangenberg. Nous traiterons ce sujet avec détail dans le chapitre IV, mais il est nécessaire d'appeler dès maintenant l'attention sur les points suivants :

M. Woehler a fait de nombreux essais de résistance aux efforts répétés par flexion et par traction ; malheureusement il n'a pas pris les précautions nécessaires pour les rendre comparables, et nous ne pouvons invoquer pour l'étude comparative de ces deux genres de déformation que les essais de son continuateur, M. Spangenberg.

Cet observateur a constaté qu'un fer de Westphalie avait supporté 457 229 à 612 065 répétitions d'un effort de flexion produisant dans ses fibres extrêmes une tension calculée de 33 à 35 kilogrammes par millimètre carré, tandis qu'il n'avait supporté que 180 800 à 596 000 répétitions d'un effort de 23^k,5 à 26^k,5 agissant par traction simple.

Le rapport des résistances aux efforts répétés par flexion et par traction a donc été supérieur à $\frac{33 + 35}{23,5 + 26,5} = 1,36$ pour ce fer de Westphalie, travaillant à des charges voisines de la limite d'élasticité.

Un acier Krupp mi-dur essayé par le même observateur a supporté 443 800 répétitions d'une flexion produisant dans ses fibres extrêmes une tension calculée de 42 kilogrammes, tandis qu'il s'est brisé après 429 000 répétitions d'une traction simple de 36^k,50 seulement. Le rapport des résistances aux efforts répétés par flexion et par traction a donc été de

$\frac{42}{36,5} = 1,15$ au moins pour cet acier mi-dur et peu ductile, travaillant à des charges voisines de sa limite d'élasticité.

Au point de vue du danger d'une même augmentation proportionnelle des charges dans la flexion et dans la traction, les essais de M. Woehler peuvent être consultés, quoiqu'ils ne se rapportent pas à des métaux identiques, parce qu'il ne s'agit plus ici de valeurs absolues, mais de rapports entre les résultats d'expériences faites sur un même métal.

En comparant les lignes 19 à 25 aux lignes 49 à 54 des tableaux insérés au paragraphe 56, on verra qu'une charge dépassant d'un huitième celle dont un certain fer pouvait supporter la répétition indéfinie a amené sa rupture après 480 852 répétitions en agissant par traction, tandis qu'elle ne l'a produite qu'après 4 035 000 répétitions environ par flexion ; on trouverait des différences analogues pour des charges dépassant la limite de sécurité de $\frac{1}{6}$ ou de $\frac{1}{4}$. Pour une augmentation d'un demi, la différence serait encore plus marquée, les nombres comparatifs étant alors de 800 et de 450 000 répétitions.

Les essais d'aciers doux manquent dans les expériences de MM. Woehler et Spangenberg ; quant à ceux qui ont été faits sur des aciers mi-durs, ils donnent des résultats de même sens que ceux des fers, mais avec des différences moins marquées, comme on devait s'y attendre d'après toutes les considérations que nous avons développées, la supériorité d'un métal au point de vue de la flexion étant proportionnelle à sa ductilité et tendant vers zéro pour les aciers durs.

42. *Valeurs relatives du métal travaillant par flexion et par traction.* — Nous venons d'établir les faits suivants

pour les barreaux à section rectangulaire, auxquels se rapportent les essais décrits ci-dessus.

Pour le fer de qualité ordinaire que nous avons expérimenté, le moment de rupture a dépassé de $\frac{92}{100}$ le moment de flexion qui correspondrait à sa résistance de traction, d'après la formule $M = \frac{TI}{n}$, et le moment limite d'élasticité a dépassé de $\frac{46}{100}$ environ le moment qui correspondrait de même à la limite d'élasticité de traction.

Pour l'acier extra-doux à $42^k,70$ de résistance et pour l'acier ductile à $57^k,8$ de résistance que nous avons essayés, la supériorité du moment de rupture par flexion a dépassé $\frac{100}{100}$, et pour le dernier la supériorité du moment limite d'élasticité a été voisine de $\frac{37}{100}$.

Pour le fer essayé par M. Spangenberg la rupture a été produite plus rapidement par un effort donné, agissant par traction, que par un effort calculé supérieur de $\frac{36}{100}$ agissant par flexion. L'acier ductile n'a pas été essayé par cet expérimentateur.

Vu l'analogie de ses propriétés et de celles du fer, nous regardons comme probable qu'il aurait donné des résultats semblables.

Lorsqu'on dépasse d'une même quantité les limites dangereuses de répétition ou d'élasticité, le danger au double point de vue de la rupture et de la valeur prise par les tensions maxima est notablement moindre, s'il s'agit de la flexion que s'il s'agit de la traction. En d'autres termes les limites dangereuses de répétition et d'élasticité sont, non-seulement plus élevées, mais en outre moins périlleuses à franchir dans la flexion que dans la traction, ce qui s'ex-

plique tout naturellement par la distance plus grande qui les sépare de la charge de rupture.

La supériorité que le fer et l'acier présentent à ces divers points de vue pour la flexion a pour cause leur ductilité; elle diminue avec elle et tombe à zéro pour les aciers très durs. Nous ne tirerons les conséquences qui découlent de ces faits, au point de vue des limites à imposer au travail du métal, qu'après avoir fait une étude analogue pour la fonte.

PROPRIÉTÉS COMPARATIVES DE LA FONTE PAR FLEXION ET PAR TRACTION.

43. *Résistance de la fonte à la traction.* — Nous avons fait sur une fonte grise de construction des essais analogues à ceux dont nous venons de rendre compte pour le fer et l'acier.

Dans une fusion de cubilot, on a coulé simultanément avec une masselote commune trois barreaux carrés de 30 millimètres de côté et de 0^m,40 de longueur et trois barreaux carrés de 30 millimètres de côté et de 1^m,04 de longueur.

Dans deux des premiers, on a tourné quatre barreaux ronds, ayant 16 millimètres de diamètre et 100 millimètres de longueur entre repères, qui ont été essayés par traction et qui ont donné des résistances à la rupture de 10^k,9 — 10^k,9 — 10^k,5 et 10^k,8 et des allongements permanents de rupture de 0,30 — 0,27 — 0,30 et 0,40 p. 100. Les allongements totaux n'ont pu être observés pour ces barreaux.

Le troisième barreau de 0^m,40 de longueur a été envoyé à Bourges, où M. le lieutenant-colonel Bubbe a bien voulu le faire essayer par traction avec les appareils de précision de la fonderie de canons. La partie cylindrique du barreau avait été tournée à 19^{mm},8 de diamètre et la distance des repères était de 301 millimètres.

Le tableau n° 3 annexé à ce mémoire donne les résultats

complets de cet essai, que nous avons représentés dans la figure 5 en prenant pour échelle des abcisses 100 millimètres par 1 p. 100 d'allongement et pour échelle des ordonnées 10 millimètres par kilogramme de tension, soit vingt fois plus que dans les épures analogues relatives au fer et à l'acier.

Les erreurs maxima qui ont pu être commises, étant donné le degré de précision des appareils de Bourges, sont pour les allongements de 0,012 p. 100 ce qui correspond à 1^{mm},2 à l'échelle de l'épure, et pour les tensions de 0^k,17 par millimètre carré, soit de 0^{mm},85 à l'échelle de l'épure; d'où il résulte en nombres ronds que chaque point de l'épure, déterminé au moyen des chiffres observés, ne peut s'écarter que d'un millimètre au plus dans tous les sens de la position rigoureuse qu'il devrait occuper.

La rupture s'étant produite au moment où la tension du métal arrivait à 11^k,30, on n'a pas eu le temps de mesurer les allongements correspondant à cette dernière charge qui auraient été ceux de rupture, mais la courbe présente une continuité si satisfaisante qu'on peut la prolonger sans grande erreur possible et obtenir par son intersection avec l'horizontale 11^k,30 le point probable de rupture T qui correspond aux chiffres suivants :

Résistance à la rupture par millimètre carré de	
section primitive.	11 ^k ,30
Allongement permanent de rupture. . .	0,55 p. 100
Allongement total de rupture.	0,90 p. 100

On admet généralement que le coefficient d'élasticité de la fonte est environ la moitié de celui du fer et est voisin de $9,5 \times 10^9$, c'est-à-dire que ce métal prend par mètre et par kilogramme de tension rapportée au millimètre carré un allongement de $\frac{1000^2}{9,5 \times 10^9} = 0^m,000105$, c'est-à-dire de 0,0105 p. 100.

Tant qu'il en est ainsi, la courbe de déformation doit évidemment se confondre avec la ligne droite OK qui a pour équation $\frac{x}{y} = 0,0105$. Or l'examen de l'épure fait reconnaître les faits suivants :

1° Etant donné le degré d'exactitude ci-dessus défini des observations, il est certain que la courbe de déformation totale de la fonte essayée ne peut se confondre avec la ligne d'élasticité parfaite OK que jusqu'à 2^k ou $2^k,5$ au maximum. — L'écart a été très sensible à partir de 3 kilogrammes.

2° A partir de la même tension de 3 kilogrammes la déformation permanente de la fonte essayée a été très notable.

La réunion de ces deux caractères permet de dire que cette fonte ne jouit, que pour des charges extrêmement faibles de 1 à 2 kilogrammes, de l'élasticité à peu près parfaite que le fer et l'acier doux possèdent jusqu'à des tensions de 15 à 20 ou 25 kilogrammes.

3° Si, à côté de la courbe des déformations totales OT on trace la courbe des déformations élastiques OE, ayant pour ordonnées les tensions et pour abscisses les déformations élastiques, c'est-à-dire les portions dont diminuent les déformations totales lorsque les tensions cessent d'agir, on reconnaît que cette courbe OE, quoique plus voisine de ligne droite OK que ne l'est la courbe des déformations totales OT, s'en écarte cependant notablement presque dès l'origine, de telle sorte que le coefficient d'élasticité de la fonte, qui est proportionnel à l'inclinaison de la tangente à cette courbe OE sur l'axe des x , n'est nullement invariable comme pour le fer et l'acier, mais diminue à tel point, lorsque la tension augmente, qu'il tombe de $9,5 \times 10^9$ à $1,8 \div 10^9$ dans le voisinage de rupture.

4° L'altération de la fonte, manifestée soit par l'accroissement plus rapide des déformations totales, soit par la

production des déformations permanentes, n'apparaît pas brusquement comme celle du fer et de l'acier; elle se développe suivant une loi tellement continue, qu'il est impossible de saisir dans les courbes de déformation un point singulier qui définisse la limite d'élasticité. Cette expression qui, au point de vue, sinon rigoureux, du moins pratique, s'applique parfaitement à toutes les variétés de fer et d'acier n'a pas de sens pour la fonte, ou tout au moins pour la fonte que nous avons essayée.

44. *Résistance de la fonte aux efforts répétés.* — Nous avons vu au chapitre IV que l'effort dont le fer et l'acier peuvent supporter sans rupture la répétition indéfinie, séparée par des retours à l'équilibre, est sensiblement égal à la limite pratique d'élasticité. Il serait fort intéressant de posséder pour la fonte des renseignements analogues qui, à défaut d'une limite d'élasticité proprement dite, permettraient de déterminer une tension équivalente au point de vue de l'effet des répétitions d'efforts. Malheureusement nous n'avons trouvé aucun essai de fonte dans le mémoire de M. Spangenberg et nous n'en avons rencontré qu'une série fort incomplète dans ceux de M. Woehler. Cet expérimentateur a soumis 10 barreaux de fonte provenant d'un cylindre de locomotive à des tractions répétées variant entre $7^k,3$ et $11^k,0$ par millimètre carré et il a obtenu la rupture pour les premiers à près 208 439, 7 200 000 et 7 600 000 répétitions et pour les derniers après 3140 répétitions.

La tension de $7^k,3$ n'ayant produit la rupture qu'après un très grand nombre d'actions, la limite de sécurité de répétition doit, pour la fonte essayée être légèrement inférieure à cette charge, soit par exemple de $6^k,5$ à $7^k,0$. Toutefois, pour que la valeur de ce chiffre fût décisive, il faudrait être fixé sur la résistance à la rupture de la fonte essayée. Malheureusement M. Woehler a omis de déter-

miner cet élément essentiel, au sujet duquel nous sommes réduit aux conjectures. Si la fonte en question était de la qualité moyenne de celle employée pour cylindres qui a une résistance de 12 à 15 kilogrammes, la limite de sécurité de répétition de 6^k,5 à 7^k,0 serait égale à la moitié environ de la résistance à la rupture, et il y a par suite des probabilités pour que la tension qu'il convient de considérer comme étant pour la fonte l'analogue de la limite d'élasticité du fer soit voisine de la moitié de la résistance à la rupture.

45. *Résistance de la fonte à la flexion.* — L'essai de traction nous ayant prouvé que les déformations de la fonte croissent plus vite que les tensions dès les plus faibles charges, et des faits nombreux ayant établi que la fonte résiste environ six fois mieux et se déforme moins par compression que par traction, on peut prévoir que le déplacement de l'axe neutre, qui ne se produit pour le fer et pour l'acier que sous des charges élevées, se manifestera pour la fonte presque dès le début de la flexion. Par suite il n'aurait pas été légitime d'admettre pour la fonte que les allongements des fibres extérieures sont proportionnels aux flèches, comme nous l'avons fait pour le fer et l'acier au-dessous et dans le voisinage immédiat de la limite d'élasticité.

En conséquence nous avons réalisé dans les essais de flexion de fonte des dispositions nouvelles, qui nous ont permis de mesurer directement les allongements des fibres extérieures et le raccourcissement des fibres intérieures. Nous avons ainsi obtenu les éléments nécessaires, non seulement pour construire rigoureusement la courbe de déformation de flexion, mais encore pour déterminer à chaque degré de flexion la position de l'axe neutre.

Un des trois barreaux de 30 millimètres de côté et de 1^m,04 de longueur coulés en même temps que les barreaux essayés par traction a été réduit par le rabotage de ses

quatre faces à une section carrée de $20^{\text{mm}},10$ de côté. Ainsi dépouillé de la peau extérieure, qui est toujours plus résistante et moins ductile que les fibres intérieures, il était dans des conditions identiques aux barreaux de traction qui avaient été essayés après tournage. Il a été placé sur deux supports espacés de $1^{\text{m}},00$; et à une distance de $0^{\text{m}},250$ de chaque support on y a suspendu un plateau destiné à être chargé de poids.

Dans l'intervalle de $0^{\text{m}},500$ existant entre les points de suspension des charges et dans lequel par suite le moment de flexion était constant, on a placé l'appareil de mesure que nous allons décrire.

Sur la face supérieure du barreau était posée une lame de tôle de $1^{\text{mm}},5$ d'épaisseur, ayant la même largeur qu'elle, et une longueur de 430 millimètres. L'une de ses extrémités était fixée invariablement au barreau par la pression d'un étrier à vis, l'autre extrémité pouvait glisser librement sur le barreau, lorsque les fibres de celui-ci se raccourcissaient, et présentait une saillie latérale de 10 millimètres débordant sur une des faces verticales du barreau. Une petite pièce en tôle fixée sur cette face verticale par un étrier à vis, en regard de l'extrémité libre de la tôle, présentait une saillie de 10 millimètres, située sur la même parallèle à l'axe du barreau que la saillie de la tôle, et dans le plan de la face supérieure du barreau. Tout raccourcissement des fibres supérieures du barreau avait donc pour effet de produire une égale augmentation de l'écartement des deux saillies, que l'on mesurait avec un Palmer donnant les centièmes de millimètre.

Une seconde lame analogue à celle décrite ci-dessus était appliquée sous la face inférieure du barreau et permettait de mesurer de la même manière l'allongement de ses fibres inférieures.

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci-après. La première colonne donne les charges successives

des plateaux, la seconde les moments de flexion correspondants, la troisième les tensions des fibres extrêmes, telles qu'elles sont données par la formule usuelle $T = \frac{Mn}{I}$, en y introduisant les valeurs du moment de flexion.

La quatrième et la sixième colonne donnent les raccourcissements et les allongements mesurés entre les saillies des lames de tôle, c'est-à-dire sur 430 millimètres, les colonnes 5 et 7 indiquent les raccourcissements et les allongements p. 100 correspondants. Enfin la dernière colonne donne la proportion dans laquelle l'axe neutre divise la hauteur du barreau à partir des fibres allongées, calculée d'après les valeurs des raccourcissements et des allongements observés, ainsi que nous l'avons indiqué au paragraphe 24.

POIDS de chaque plateau P	MOMENTS de flexion correspondants $M = P \times 0,250$	TENSIONS des fibres extrêmes calculées par la formule $T = \frac{Mn}{I} = 0,74 M$	RACCOURCISSEMENTS		ALLONGEMENTS		DISTANCE de l'axe neutre aux fibres extérieures $\frac{a' + r'}{a'}$
			TOTAUX r	par mètre $r' = \frac{r}{0,43}$	TOTAUX a	par mètre $a' = \frac{a}{0,43}$	
1	2	3	4	5	6	7	8
kil.	km.	kil.	mm.	mm.	mm.	mm.	
0	0	0	0	0	0	0	0
10	2,50	1,850	0,14	0,32	0,13	0,30	0,484
20	5,00	3,700	0,30	0,70	0,28	0,65	0,482
30	7,50	5,550	0,44	1,02	0,49	1,14	0,527
40	10,00	7,400	0,66	1,53	0,71	1,63	0,515
50	12,50	9,250	0,86	2,00	0,99	2,30	0,535
60	15,00	11,100	1,06	2,46	1,33	3,09	0,556
70	17,50	12,950	1,24	3,11	1,74	4,04	0,565
80	20,00	14,800	1,56	3,63	2,15	5,00	0,579
90	22,50	16,650	2,21	5,14	3,21	7,46	0,592
95	23,75	17,575	2,37	5,51	3,51	8,16	0,597
97	24,25	17,945	2,43	5,65	3,60	8,37	0,597
0	0	0	1,16	2,70	1,96	4,56	0,623
80	20,00	14,800	2,25	5,23	3,45	8,02	0,605
95	23,75	17,575	2,43	5,65	3,78	8,79	0,608
98	24,50	18,130	2,50	5,81	3,90	9,06	0,608
101	25,25	18,685	2,56	5,95	3,98	9,25	0,608
104	26,00	19,240	2,63	6,11	4,11	9,55	0,609
107	26,75	19,795	2,68	6,23	4,22	9,81	0,612
110	27,50	20,350	2,88	6,69	4,53	10,53	0,612
111,5	27,87	20,630	3,02	7,00	4,80	11,20	0,614

Comme pour le fer et l'acier on a tracé d'après ces résultats la courbe de déformation par flexion sur la même

épure que la courbe de déformation par traction (fig. 5).

On a pris pour abscisses les allongements des fibres extrêmes, représentés à la même échelle de 100 millimètres pour 1 p. 100 d'allongement et pour ordonnées les moments de flexion à l'échelle de $7^{\text{mm}},4$ par kilogrammètre. Ces mêmes ordonnées représentent donc aussi les tensions calculées, à l'échelle de la courbe de traction, c'est-à-dire à raison de 10 millimètres par kilogramme, puisque les tensions sont égales aux $\frac{74}{100}$ des moments, vu les dimensions du barreau.

Le choix de ces échelles étant analogue à celui que nous avons adopté pour l'acier, les conséquences développées au paragraphe 35 s'appliquent au cas actuel, et le rapport des ordonnées de la courbe de flexion et de la courbe de traction, qui correspondent à une même abscisse, donne le degré d'erreur de la formule $T = \frac{Mn}{I}$, les deux courbes devant se confondre si elle était exacte.

On remarquera que la courbe de flexion n'est pas continue. Cela tient à ce qu'après avoir obtenu le point A correspondant à un moment de flexion égal à $24^{\text{km}},25$, nous avons supprimé la charge pour mesurer l'allongement permanent, qui a été trouvé égal à OB; puis le moment de flexion a été ramené à 20 kilogrammètres et poussé graduellement jusqu'à la valeur de $27^{\text{km}},87$ qui a déterminé la rupture au point U.

Un point, dont les coordonnées auraient correspondu à chaque instant à l'état des fibres extrêmes, aurait donc suivi la trajectoire OABCU. D'après les essais, dont nous rendrons compte au paragraphe 51, il est probable que, si on avait chargé d'une manière continue, on aurait obtenu une courbe voisine de OAU'; le point U' étant en tout cas très rapproché du point U.

La comparaison des courbes de flexion et de traction donne les résultats suivants :

1° Le rapport entre le moment de rupture réel et le moment calculé est égal au rapport des ordonnées des points U et T soit à $\frac{20,63}{11,30} = 1,82$; c'est un peu moins qu'on ne l'admet généralement, en disant que la fonte résiste deux fois mieux par flexion que par traction.

2° Le rapport des ordonnées correspondant à une même abcisse diminue rapidement lorsqu'on se rapproche de l'origine, et on en trouvera par suite des valeurs très variables suivant la tension pour laquelle on voudra faire la comparaison.

Nous avons vu plus haut que la courbe de déformation de la fonte ne présente pas de point singulier qui puisse définir la limite d'élasticité, mais, que les essais de M. Woehler tendraient à établir que la tension qui, au point de vue des efforts répétés, jouit pour la fonte des mêmes propriétés que les limites d'élasticité du fer et de l'acier est voisine de la moitié de la tension de rupture. En admettant même que la fonte prise par M. Woehler dans un cylindre à vapeur ait été de très médiocre qualité, ce qui est peu probable, et qu'elle n'ait eu par exemple que 10 kilogrammes de résistance, la limite de sécurité de répétition de $6^k,5$ à $7^k,0$ trouvée par expérience serait en tous cas inférieure aux $\frac{70}{100}$ de la résistance à la rupture.

Nous regardons en conséquence comme incontestable que la tension qui doit jouer pour la fonte que nous avons essayée le même rôle que la limite d'élasticité et la limite de sécurité de répétition pour le fer et l'acier est inférieure à $rR = \frac{70}{100} tT$. Le rapport des ordonnées des deux courbes qui correspondent à cette limite est $\frac{rR'}{rR} = 1,31$.

Il en résulte que, lorsque les fibres extrêmes du barreau essayé travaillaient par flexion au degré de tension dont la

répétition prolongée aurait amené la rupture, le moment de flexion réel ne dépassait que de 3 p. 100 au plus le moment de flexion calculé correspondant à cette tension.

3° La dernière colonne du tableau montre que l'axe neutre du barreau essayé s'est déplacé même sous l'action des plus faibles charges et qu'il est arrivé aux $\frac{614}{1000}$ de la hauteur avant la rupture, bien que l'allongement maximum des fibres n'eût alors atteint que la valeur de 1,12 p. 100. L'importance relative du déplacement de l'axe neutre est donc beaucoup plus grande pour la fonte que pour le fer et l'acier.

C'est de cette manière que se traduisent les conséquences de la grande supériorité de la résistance à la compression de ce métal.

46. — Nous venons de rendre compte avec détail des résultats complets de l'essai fait sur l'un des trois barreaux de 1^m,04 de longueur. Les deux autres ont été essayés avec des retours plus nombreux à l'équilibre, de manière à permettre de mesurer les allongements permanents. Sans donner tous les chiffres obtenus, nous croyons utile d'indiquer les suivants :

L'allongement permanent par mètre que les fibres extrêmes de ces barreaux de fonte ont pris par flexion après avoir subi une tension calculée de :

2 ^k ,10	a été de	0 ^{mm} ,0160	par mètre.
3 ^k ,04	—	0 ^{mm} ,0336	—
11 ^k ,51	—	0 ^{mm} ,6140	—

Dans un des essais dont il a été question au paragraphe 39 nous avons trouvé les résultats suivants :

L'allongement permanent par mètre que les fibres extrêmes d'un barreau de fer ordinaire ont pris par flexion après avoir subi une tension calculée de :

19 ^k ,50	a été de	0 ^{mm} ,0048	par mètre.
27 ^k ,30	—	0 ^{mm} ,0256	—
35 ^k ,10	—	0 ^{mm} ,1536	—

En comparant entre eux les chiffres qui précèdent, on voit que, pour une tension calculée de 2^k,10, la fonte a pris par flexion un allongement permanent environ trois fois plus fort que celui que le fer a pris pour une tension calculée de 19^k,50, et que pour une tension de 2^k,60 environ la fonte se déformerait autant que le ferait le fer pour la tension de 27^k,30.

Nous croyons être en droit de tirer de ce qui précède les conclusions suivantes pour la fonte grise douce et ductile que nous avons essayée en barreaux carrés.

Cette fonte présente par flexion une supériorité par rapport à la traction de 82 p. 100 au point de vue de la rupture et de 31 p. 100 au plus au point de vue de la résistance aux efforts répétés. Son élasticité est imparfaite, même sous les charges les plus faibles, et dans la flexion, des tensions de 2 à 3 kilogrammes lui causent une altération aussi forte que celle que le fer ordinaire éprouve sous l'action de charges 10 à 15 fois plus considérables.

On a dit que la supériorité de résistance de la fonte à la flexion tient simplement à ce que cette déformation résulte de tractions et de compressions et que sa résistance doit être une moyenne entre celles des déformations élémentaires qui la produisent. Pour réfuter cette opinion, il suffira de rappeler que, dans les aciers doux la résistance à la flexion est supérieure de beaucoup, tant à la résistance par traction qu'à la résistance par compression, et que, dans les aciers très durs, elle est à peine égale à la résistance par traction, tandis que la résistance à la compression est considérablement plus élevée.

Si donc la résistance à la compression influe sur la résistance à la flexion, c'est par le mécanisme complexe que

nous avons décrit et qui produit dans certains cas des résultats opposés à ceux qu'on serait tenté d'en attendre.

47. *Influence de la forme de la section sur la résistance à la flexion.* — On sait que la forme de la section transversale d'une barre n'influe sur sa résistance à la traction que d'une manière négligeable en pratique et on comprend qu'il doit en être ainsi, parce que chaque fibre étant soumise au même effort que ses voisines ne peut ni leur donner ni en recevoir un secours efficace.

Les explications que nous avons données du mécanisme de la flexion font prévoir qu'il doit en être tout autrement dans cette déformation. La supériorité de la résistance à la flexion venant de l'aide que les fibres extrêmes recoivent des fibres intérieures et les fibres tirées des fibres comprimées, elle doit être d'autant plus marquée que la proportion des fibres intérieures aux fibres extrêmes est plus élevée et que la liaison est plus complète entre les parties tirées et les parties comprimées.

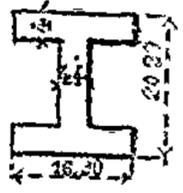
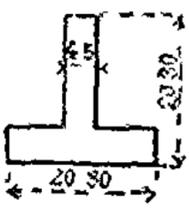
La section circulaire doit donc donner une résistance à la flexion plus élevée que les sections carrées ou rectangulaires, tandis que les sections évidées donneront une résistance moins considérable. Il est même évident que la forme limite d'un double I dont les ailes seraient très minces, et dont l'âme serait négligeable par rapport aux ailes, donnerait une résistance à la flexion mathématiquement égale à la résistance à la traction, puisque les trois causes d'inégalité disparaîtraient à la fois. En effet toutes les fibres étant dans ce cas à la même distance de l'axe, l'influence de la convexité de la courbe de déformation serait nulle ; le gonflement de l'aile comprimée ne pourrait compenser la striction de l'aile allongée, vu l'indépendance des deux ailes et enfin le déplacement de l'axe neutre, quel qu'il fût, ne changerait rien à la valeur du moment produit par les deux forces égales qui agiraient suivant les lignes de gravité des ailes.

Il était important de vérifier par l'expérience l'exactitude de ces déductions et de mesurer la résistance à la flexion de diverses sections. C'est la fonte que nous avons choisie pour ces essais, parce qu'il est facile en tous cas de produire sa rupture franche, tandis que, pour le fer et l'acier de bonne qualité, il est presque impossible de briser sans voilement les sections évidées. Nos expériences ont porté sur deux qualités de fonte grise, l'une douce et médiocrement résistante, l'autre dure et exceptionnellement résistante.

48. *Essais de fonte grise douce.* — Les barreaux essayés étaient formés de la fonte dont le tableau annexe n° 3 donne l'essai complet de traction et dont le tableau inséré au paragraphe 45 relate l'essai de flexion en section carrée. Les caractéristiques de ce métal au point de vue de la traction (voir paragraphe 43) sont les suivantes :

Résistance de traction.	11 ^k ,30
Allongement permanent de rupture	0,55 p. 100
Allongement total de rupture	0,90 p. 100

Dans diverses barres de cette fonte, nous avons fait façonner à l'outil des barreaux dont les sections sont indiquées dans le tableau suivant en regard des résultats obtenus par flexion.

FORME des	Numéros d'ordre.	RÉSIS- TANCE à la traction R	MOMENT de rupture correspondant calculé par la formule $M' = \frac{RI}{\alpha}$	MOMENT de flexion qui a réellement produit la rupture M	RAPPORT DU MOMENT de rupture réel au moment calculé $\frac{M}{M'}$		
					PAR BARREAU.	MOYENNE.	
1	2	3	4	5	6	7	
Barreaux en I		kil.	km.	km.			
	1	11,30	10,70	16,12	1,50	1,40	
	2	Id.	10,20	13,32	1,30		
B arreaux en I							
	3	Id.	9,71	14,70	1,51	1,48	
	4	Id.	10,07	14,67	1,46		
On a vu au § 45 que les barreaux carrés ont donné le rapport						1,82	
Barreaux ronds.							
	5	Id.	9,31	20,99	2,25	2,21	
	6	Id.	9,73	21,16	2,17		

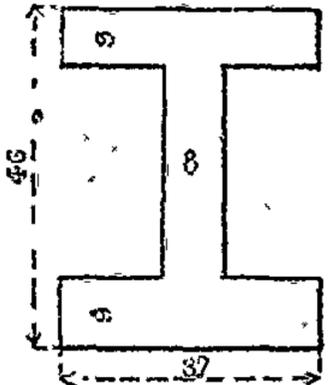
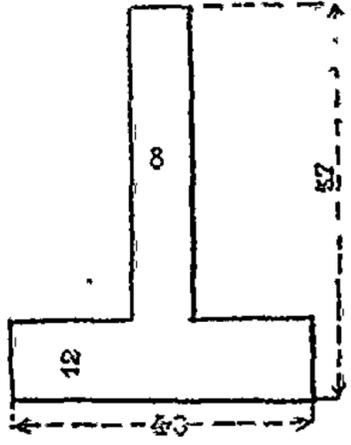
Les légères différences qui existent entre les moments calculés des deux barreaux de chaque type inscrits dans la colonne 4 viennent de ce qu'on a tenu compte des dimensions exactes relevées au Palmer dans les cassures, qui n'ont pas été trouvées absolument conformes à la section moyenne indiquée dans les croquis.

49. *Essais de fonte grise dure.* — Tous les barreaux de cette série d'essais proviennent, comme les précédents,

d'une coulée unique de fonte. Néanmoins, pour éviter autant que possible les chances d'erreur résultant des inégalités de qualité, nous avons multiplié les essais de traction sur les extrémités des barres rompues par flexion.

Nous n'avons pas pu mesurer l'allongement permanent de cette fonte ; quant à son allongement total de rupture, il a été trouvée égal à 0,36 p. 100.

A l'encontre de ce qui a eu lieu pour la fonte douce, tous les barreaux de cette série ont été essayés bruts de fonderie.

FORME des barreaux 1	Numéros d'ordre. 2	RÉSIS- TANCE à la traction R 3	MOMENT de rupture correspondant calculé par la formule $M' = \frac{RI}{z}$ 4	MOMENT de flexion qui a réellement produit la rupture M 5	RAPPORT DU MOMENT de rupture réel au moment calculé $\frac{M}{M'}$	
					PAR BARREAU. 6	MOYENNE. 7
Barreaux en I 	1	22,4	234	275,7	1,18	1,15
	2	22,4	214	263,7	1,08	
	3	22,4	234	278,0	1,19	
	4	22,4	234	270,3	1,15	
Barreaux en L 	5	22,0	231	321,83	1,15	1,11
	6	22,0	231	300,10	1,07	
Barreaux rectangulai- res de 16 ^{mm} ,4 de hau- teur et de diverses largeurs.	7	20,9	13,10	20,23	1,54	1,57
	8	20,9	11,3	20,24	1,78	
	9	23,5	12,32	17,30	1,41	
	10	23,0	15,70	23,60	1,50	
Barreau carré de 11 mil- limètres.	11	25,5	6,78	11,00	1,62	1,84
Barreaux ronds de 16 millimètres envi- ron de diamètre.	12	25,50	10,07	18,50	1,85	
	13	25,50	10,04	17,60	1,76	
	14	22,70	7,64	14,79	1,93	
	15	23,05	9,97	19,02	1,91	

50. *Influence de la ductilité sur la résistance à la flexion.* — En comparant les septièmes colonnes des deux tableaux, on reconnaît, qu'ainsi que nous l'avons déjà constaté et expliqué pour le fer et l'acier, la résistance à la flexion de la fonte dépasse d'autant plus la résistance à la traction que le métal est plus ductile. La supériorité de résistance que les fontes dures présentent sur les fontes douces est donc moindre dans la flexion que ne le feraient supposer les essais de traction simple.

Si, au lieu de résistance statique, il s'agissait d'efforts dynamiques produits par flexion, les fontes douces seraient supérieures aux fontes dures d'une façon absolue, puisque le travail de rupture est la somme des produits des résistances par les déformations et que celles-ci sont beaucoup plus fortes dans les fontes douces que dans les fontes dures.

51. *Résistance à la rupture comparative des diverses formes de sections.* — La résistance à la traction étant représentée par l'unité, la résistance à la flexion a été trouvée pour les sections en I \perp \square \bigcirc dans le cas de la fonte douce de 1,40-1,48-1,82-2,21 et dans le cas de la fonte dure de $\underline{1,15}$ - $\underline{1,11}$ - $\underline{1,57}$ - $\underline{1,84}$, soit en moyenne de. 1,27-1,30-1,70-2,02.

Ces résultats établissent que l'avantage des sections évidées est moindre au point de vue de la rupture qu'on ne devrait le croire d'après le résultat des calculs théoriques.

Il est facile de comparer sous ce rapport la valeur des sections différentes ayant même hauteur totale, car les barreaux de la première série ont tous 20^{mm},20 de hauteur à quelques centièmes de millimètre près. L'effet utile du métal peut être représenté par le rapport du moment réel de rupture à l'aire de la section; il est donné pour les diverses formes par le tableau suivant.

FORME des BARREAUX	AIRE de la SECTION	MOMENT de RUPTURE	RAPPORT du moment A L'AIRE
	mm.	km.	
Barreaux en \equiv	190	14,72	7,75
— \perp	173	14,68	8,49
— rectangulaires.	406	27,87	6,86
— ronds.	325	21,08	6,50

Si on comparait des sections ayant, non plus une même hauteur, mais une aire équivalente et produisant par suite un poids égal par mètre courant, on arriverait à des résultats différents.

Ainsi dans la seconde série d'essais, le moment de rupture moyen des barreaux à \equiv étant égal à. . . 271^{km},90
 on trouve que le moment de rupture de barreaux de même poids, ayant une forme semblable aux barreaux à \perp que nous avons essayés, serait égal à. 328, 00
 et que des barreaux rectangulaires de 60 millimètres \times 14^{mm},2 qui auraient aussi le même poids et seraient formés de la même fonte ayant 22^k,4 de résistance à la traction, auraient un moment de rupture égal à.

$$1,57 \frac{Rah^2}{9} = 1,57 \frac{22\,400\,000^k \times 0^m,0142 \times 0^m,06^2}{6} = 299,90$$

On arrive donc à reconnaître qu'un barreau à section rectangulaire de 60 millimètres sur 14^{mm},2 supporterait un moment de flexion plus élevé qu'un barreau à \equiv de même poids et de 46 millimètres de hauteur, bien que l'application de la formule théorique $M = \frac{RI}{n}$ conduise à prévoir l'inverse. On voit également que pour la fonte, la forme à \perp est plus avantageuse que les sections symétriques, comme on l'admet généralement.

52. *Valeur comparative de la limite d'élasticité pour diverses formes de sections.* — Nous avons vu aux paragraphes 43 et 44, qu'à défaut de point singulier de la courbe de déformation, qui permette de préciser *a priori* la limite pratique d'élasticité de la fonte, on est conduit à chercher dans les expériences de M. Wochler des indications sur la valeur de l'effort dont l'action répétée ou prolongée amènerait une altération du métal. Nous sommes ainsi arrivé à admettre pour une fonte douce essayée en barreaux rectangulaires que cette limite dangereuse était plus élevée de 31 p. 100 dans la flexion que dans la traction, alors que la résistance à la rupture était plus élevée de 82 p. 100. — L'augmentation de la limite dangereuse constatée pour la fonte essayée, lorsqu'on passe de la traction à la flexion serait donc les $\frac{31}{82}$, soit les $\frac{40}{100}$ environ de l'augmentation de la résistance à la rupture.

A défaut d'essais d'élasticité exécutés comparativement sur des barreaux des diverses formes qui nous intéressent, nous admettrons que pour toutes, lorsqu'on passe de la traction à la flexion, le rapport de l'augmentation de la limite dangereuse de la fonte à l'augmentation de la résistance à la rupture est, comme dans le cas des barreaux rectangulaires essayés, égal à $\frac{40}{100}$. Il est presque certain que cette hypothèse n'est pas rigoureusement exacte, mais il nous semble qu'elle ne peut s'éloigner beaucoup de la vérité. Si on l'admet, on conclut des chiffres inscrits aux premières lignes du paragraphe 51 que la limite dangereuse de traction de la fonte étant représentée par l'unité, sa limite dangereuse de flexion est en moyenne pour les sections

en.	⊥	⊥	□	○
de.	1,11	1,12	1,28	1,40

53. *Essais de fer et d'acier.* — Comme nous l'avons dit

au paragraphe 47, il est généralement impossible de briser par flexion des barres profilées de fer ou d'acier de bonne qualité; elles se gauchissent et se tordent bien avant de se rompre; aussi n'avons-nous obtenu que des résultats très incomplets en ce qui concerne l'influence de la forme sur la résistance à la flexion de ces deux métaux. Toutefois les essais que nous avons faits ont prouvé que leurs propriétés à ce point de vue sont analogues à celles de la fonte.

Ainsi un barreau rond de $47^{\text{mm}},5$ de diamètre en fer n° 3 du Creusot a supporté sans rupture un moment de flexion de $916^{\text{km}},86$. L'essai a dû être arrêté par suite de la courbure excessive du barreau. Une barrette de ce métal, essayée par traction, a donné une résistance de $37^{\text{k}},5$, de sorte que le moment de rupture calculé par la formule

$$M = \frac{RI}{n} = \frac{R\pi d^3}{32}$$

ne serait que de 382 kilogrammètres.

Le rapport du moment de flexion supporté sans rupture au moment calculé s'est donc élevé pour ce barreau rond à $\frac{916,86}{382} = 2,40$ et il aurait dépassé ce chiffre, si on avait pu pousser l'essai plus loin.

Ce rapport, plus élevé que les plus fortes valeurs trouvées pour des barreaux de fer carrés ou rectangulaires, prouve que, pour le fer comme pour la fonte, la section circulaire est très favorable à la résistance à la rupture. Les sections elliptiques jouiraient de la même propriété.

Nous avons essayé à la flexion plusieurs rails en acier à double boudin et nous avons trouvé pour le rapport des moments de rupture réels aux moments calculés, des chiffres variant de $1,38$ à $1,50$, c'est-à-dire des valeurs moindres que pour les barreaux rectangulaires.

Ici encore il y a donc accord avec les résultats obtenus pour la fonte et, bien que ces exemples soient peu nombreux, il nous semble permis de conclure avec beaucoup de vraisemblance que l'influence de la forme sur la résistance

à la flexion suit pour le fer et l'acier des lois analogues à celles que nous avons reconnues pour la fonte.

54. *Valeurs comparatives des efforts à imposer aux métaux travaillant par flexion et par traction.* — Lorsqu'il s'agit de déterminer les valeurs maxima des efforts qu'il convient d'imposer aux métaux, on se trouve en présence de deux opinions bien distinctes.

Une partie des Ingénieurs pensent que l'effort, auquel on doit limiter le travail d'un métal, est une certaine fraction déterminée de l'effort qui produirait la rupture immédiate. Les autres estiment que, dans la fixation de l'effort à imposer au métal, ce n'est pas la charge de rupture qu'il faut prendre comme base, mais bien la limite d'élasticité, parce qu'on ne peut pas la dépasser sans déformation importante, ou encore la limite dangereuse de répétition, dont M. Woehler a démontré l'existence et qui, pour les efforts séparés par des retours à l'équilibre, semble se confondre avec la limite d'élasticité.

Une discussion qui a eu lieu récemment à la Société des Ingénieurs civils a prouvé que l'accord sur cette question n'existe pas plus aujourd'hui qu'il y a cinquante ans, et il peut en être ainsi sans inconvénients graves, tant qu'il ne s'agit que de barres ordinaires supportant des efforts de traction, car on sait que, pour le fer et l'acier de qualité courante et non écrouis, la limite d'élasticité varie à peu près proportionnellement à la résistance à la rupture, de telle sorte qu'on arrive au même résultat, quelque opinion que l'on adopte, à la seule condition de choisir une valeur convenable pour le coefficient de sécurité.

Il n'en est plus ainsi, lorsqu'il s'agit de comparer la flexion à la traction, puisque la variation de la limite d'élasticité qui se produit lorsqu'on passe de l'une à l'autre n'est que les $\frac{40}{100}$ environ de celle que subit la résistance à

la rupture. Il est donc impossible de conclure dans le sujet qui nous occupe, sans prendre un parti entre les opinions contraires que nous avons rappelées.

Pour mieux faire ressortir les conséquences des choix que l'on fera, nous considérerons deux cas extrêmes; d'une part celui d'un fil de fer non recuit travaillant par traction, dans lequel le rapport $\frac{L}{R}$ peut s'élever à $\frac{90}{100}$, de l'autre celui d'un barreau de fer doux résistant par flexion, pour lequel $\frac{L}{R}$ peut être égal à $\frac{30}{100}$.

Si on proportionne le travail du métal à la charge de rupture, en le fixant au $\frac{1}{5}$ par exemple, le fil de fer travaillera aux $\frac{1}{5} \times \frac{100}{90} = \frac{22}{100}$ et le barreau aux $\frac{1}{5} \times \frac{100}{30} = \frac{67}{100}$ de la limite d'élasticité. Une erreur légère dans les calculs ou une aggravation peu sensible des efforts prévus, exposera donc le barreau à une déformation grave, tandis que le fil de fer n'en aura aucune à craindre à moins d'erreurs énormes.

La règle suivie dans ce cas laisse donc à désirer, mais il en est exactement de même de la règle opposée. Supposons en effet que ce soit à la limite d'élasticité que l'on proportionne l'effort en le fixant au $\frac{1}{3}$, le fil de fer travaillera aux $\frac{1}{3} \times \frac{90}{100} = \frac{30}{100}$ et le barreau aux $\frac{1}{3} \times \frac{30}{100} = \frac{10}{100}$ de la charge de rupture. Le fil sera donc trop exposé à se briser, tandis que le barreau présentera une sécurité exagérée à ce point de vue.

Il nous semble par suite que la vérité est entre les deux opinions extrêmes, et que c'est à une moyenne entre la

limite d'élasticité et la résistance à la rupture qu'il convient de proportionner l'effort du métal. Si on adopte cette conclusion et si on représente par 1 l'effort à accepter pour la traction simple, les chiffres obtenus aux paragraphes 51 et 52 conduiront à admettre que les efforts calculés qu'on ne doit pas dépasser pour la fonte travaillant par flexion en barres à $\underbrace{\text{I} \quad \text{L}}_{1,20}$ \square \circ sont représentés. par les nombres 1,20 1,50 1,70.

Pour le fer et l'acier, les résultats de nos essais amèneraient à faire entre la flexion et la traction une différence plus grande encore que celle qui est la conséquence de ces chiffres établis pour la fonte. Toutefois la prudence invite à s'écarter moins rapidement des usages établis que ne le conseilleraient les déductions théoriques, c'est-à-dire à adopter pour la fonte fléchie des efforts un peu supérieurs et pour le fer et l'acier des efforts un peu inférieurs à ceux qui résulteraient des chiffres ci-dessus.

Nous ne croyons pas devoir préciser davantage nos conclusions sur cette question qui, pour les travaux de l'État, ne peut être tranchée définitivement que par décision ministérielle et après des essais plus nombreux et variés, qui permettront de juger le bien fondé des opinions que nous venons de développer.

55. *Emploi de la flexion pour les essais de qualité.* — Nous avons conclu au paragraphe 16 que l'allongement de striction, bien mieux que l'allongement proportionnel de traction, donne la mesure de la ductilité du métal. D'autre part il a été établi dans le présent chapitre, que l'allongement qui se produit dans la flexion est égal ou proportionnel à l'allongement de striction. Il en résulte qu'un simple pliage à froid, exécuté au marteau sur un morceau découpé dans la tôle ou la barre que l'on veut essayer donne une idée plus exacte de la ductilité du métal que les essais de traction, qui exigent l'emploi de machines compli-

quées. Il suffit de mesurer l'allongement que le métal prend sur sa surface extérieure en se rompant par flexion, pour avoir la mesure de sa ductilité.

On ne saurait trop recommander ces essais, qui peuvent si facilement être exécutés au chantier, même sur des rognures. Toutefois il faut noter que, si les morceaux qu'on essaie par pliage sont découpés à la cisaille, il est indispensable d'enlever à la lime 2 millimètres environ d'épaisseur sur la coupe, pour faire disparaître le métal altéré.

Les essais de traction ne seraient ainsi nécessaires que pour mesurer la résistance, et nous pensons que, sauf pour les tôles travaillant en travers, ils pourraient être réduits à un petit nombre, lorsqu'il s'agit du fer ; car la résistance à la traction de ce métal est sensiblement constante, quelle que soit sa qualité. Ce qui varie réellement beaucoup pour le fer, c'est la ductilité, et les essais de pliage suffisent pour la mesurer.

TORSION.

56. *Torsion.* — La tension étant un genre de déformation qu'on rencontre rarement dans les constructions, nous n'en dirons que quelques mots.

La torsion se décompose en cisaillements élémentaires, et il semble par suite que la résistance à la torsion doit être en rapport avec la résistance au cisaillement. Or en réalité elle est plus forte. Ainsi le fer, qui a une résistance au cisaillement de 30 kilogrammes a une résistance de 38 à 40 kilogrammes à la torsion ; l'acier doux, qui a une résistance au cisaillement de 35 kilogrammes a une résistance de 45 à 50 kilogrammes à la torsion, la tension des fibres extrêmes étant, comme pour la flexion, calculée par la formule usuelle.

La raison de ce fait a de l'analogie avec les causes de la supériorité de la résistance à la flexion.

La formule de la torsion, comme celle de la flexion, n'est

exacte qu'autant que les tensions sont proportionnelles aux déplacements relatifs des molécules et par suite aux distances à l'axe. Or, pour le cisaillement comme pour la traction, il y a une limite d'élasticité, et la courbe de déformation, à peu près rectiligne en deçà, devient très convexe au delà. Par suite la courbe des tensions des molécules situées sur le diamètre AOB d'un cylindre soumis à la torsion, dont l'axe se projette au point O a la forme C'M'OMC au lieu de former une ligne droite COC', comme le suppose la formule usuelle (fig. 14).

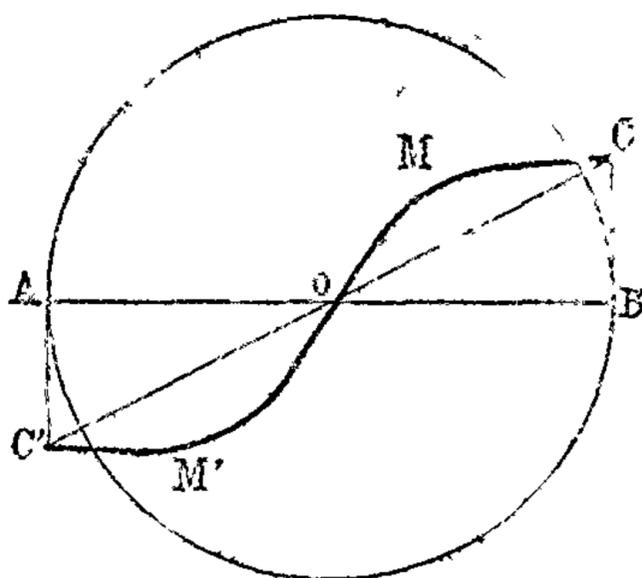


Fig. 14.

On comprend sans insister davantage que dans ces conditions le moment réel de torsion doit être supérieur au moment calculé. Toutefois la différence est bien moindre que pour la flexion, parce qu'il n'y a dans ce cas qu'une cause d'augmentation : le bombement de la courbe des tensions, tandis que dans la flexion il y a en outre le déplacement de l'axe neutre et pour le fer et l'acier une différence considérable de la valeur de l'ordonnée extrême correspondant à la tension des fibres extérieures.

RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE DE LA FLEXION.

La formule dont on se sert pour calculer la résistance d'un métal à la flexion au moyen de sa résistance à la traction est $m = \frac{TI}{n}$, dans laquelle m désigne le moment de flexion et T la tension des fibres extrêmes. Pour obtenir le moment de rupture M , on remplace T par R . Résistance à la rupture par traction rapportée à la section primitive.

On sait que cette formule doit cesser d'être exacte dès que l'élasticité du métal a subi la moindre altération; mais on ne s'est préoccupé ni des causes ni des conséquences de ce fait.

Les trois causes de l'inexactitude de la formule de la flexion sont :

- 1° La convexité de la courbe de déformation par traction;
- 2° Le déplacement de l'axe neutre;
- 3° La conservation et même l'augmentation de l'aire de la section transversale jusqu'à la rupture.

De ce dernier fait il résulte qu'on chercherait vainement à établir une relation quelconque entre M et R , R étant une abstraction, qui n'a de sens qu'au point de vue de la traction, ainsi que nous l'avons établi au paragraphe 10 et ne représentant nullement la résistance réelle du métal au moment de la rupture.

En réalité, le moment de rupture par flexion ne peut dépendre que de la résistance réelle à la traction, rapportée à la section de rupture, que nous avons désignée par R^s ou résistance de striction.

De même la flèche de rupture n'est pas en rapport avec l'allongement entre repères α qu'on mesure habituellement dans les épreuves de traction, mais avec l'allongement de striction A , mesuré dans la section de rupture par traction.

En conséquence le travail de rupture par flexion dépend de R^s et de A et non de R et de a .

Il n'y a aucune proportionnalité entre R^s et R , ni entre A et a ; ainsi R^s dépasse très peu R dans les aciers durs, tandis qu'il atteint la valeur $2R$ dans les aciers extra-doux. De même A , peu supérieur à a pour les premiers, peut arriver à $6a$, $7a$ et même $8a$ pour les derniers.

Il en résulte que, non seulement la formule théorique ne donne pas les valeurs réelles du moment de rupture, mais même que les chiffres qu'elle fournit ne leur sont nullement proportionnels.

Si on désigne par M le moment réel de rupture par flexion et par M' le moment calculé, le coefficient d'erreur de la formule $\frac{M}{M'}$ varie de 1,00 pour les aciers carburés très durs à 2,40 au moins pour les aciers extra-doux.

On ne peut pas augmenter sensiblement la résistance à la rupture par flexion des aciers en forçant la dose de carbone, bien qu'on arrive ainsi à doubler au moins leur résistance à la traction.

On réussit au contraire à augmenter la résistance à la rupture par flexion en ajoutant du manganèse ou du chrome.

Ces faits s'expliquent parce que le carbone à forte dose diminue très rapidement la striction et empêche par suite R^s d'augmenter en même temps que R . Il n'en est pas de même du manganèse et surtout du chrome.

Il y a beaucoup plus de différence entre les métaux de bonne et de mauvaise qualité au point de vue de la flexion qu'à celui de la traction.

La formule $m = \frac{TI}{n}$ n'est pas seulement inexacte près de la rupture; son coefficient d'erreur atteint 1,40 à 1,50, dès que l'on dépasse la limite pratique d'élasticité.

Le moment-limite d'élasticité réel de flexion dépasse le moment calculé d'après la valeur de la limite d'élasticité de traction, des $\frac{40}{100}$ environ de la quantité dont le moment de rupture réel par flexion dépasse le moment calculé.

La forme influe beaucoup sur la résistance à la flexion. Plus la section transversale est massive près de l'axe neutre, plus le rapport du moment réel au moment calculé a une valeur élevée.

Pour les formes en.				
Le rapport $\frac{M}{M'}$ a été égal pour une fonte douce à.	1,40	1,48	1,82	2,21
Le rapport $\frac{M}{M'}$ a été égal pour une fonte dure à.	1,15	1,11	1,57	1,84
Moyennes.	1,27	1,30	1,70	2,02

Pour la fonte, comme pour le fer et l'acier, le rapport $\frac{M}{M'}$ augmente avec la ductilité.

Nous pensons que les efforts à imposer à un métal doivent être proportionnels à une moyenne entre sa limite pratique d'élasticité et sa charge de rupture. Si on l'admet, on conclut de nos expériences qu'en moyenne pour la fonte, l'effort admis pour les pièces travaillant par traction simple étant pris pour unité, les efforts à fixer pour les pièces fléchies, ayant les sections ci-dessus, doivent être proportionnels aux chiffres. 1,20 1,20 1,50 1,70.

Nous n'avons pas fait assez d'essais sur des barres profilées de fer et d'acier pour donner des chiffres précis en ce qui concerne ces métaux, mais nous pensons que pour les qualités moyennes de construction on peut, en attendant de nouvelles expériences, admettre les mêmes chiffres que pour la fonte.

A la rigueur, les résultats que nous avons obtenus conduiraient même à majorer le travail de flexion du fer et de l'acier, plus que celui de la fonte, contrairement à l'usage admis.

CHAPITRE IV.

EXPÉRIENCES RELATIVES A L'EFFET DES EFFORTS PROLONGÉS OU RÉPÉTÉS.

57. Dans les chapitres II et III nous nous sommes borné à résumer les phénomènes qui se produisent lorsqu'on soumet le métal à des efforts qui durent quelques minutes ou au plus quelques heures.

Nous allons maintenant faire connaître les expériences qui ont été exécutées en vue de déterminer l'effet des efforts dont l'action dure longtemps ou se répète un grand nombre de fois.

EXPÉRIENCES DE VICAT.

58. Vicat a rendu compte en 1834, dans les *Annales des Ponts et Chaussées*, des essais qu'il avait poursuivis pendant trois ans en vue de déterminer la charge maximum qu'il convient d'imposer aux câbles en fil de fer des ponts suspendus. Il prit 4 brins de fil de fer n° 4 non recuit, ayant une résistance à la rupture de 43^k,25 par fil, ce qui correspond à 69 kilogrammes environ par millimètre carré.

Le 12 juin 1830 il les chargea respectivement

	de 10 ^k ,70	— 14 ^k ,25	— 21 ^k ,50	— 32 ^k ,25
représentant	1/4	1/3	1/2	3/4

du poids de, 43^k,25 qui avait produit la rupture instantanée.

Il ne constata pas l'allongement initial au moment du chargement. L'appareil de mesurage, mis en place après cette opération, donnait les allongements produits sur 1 mètre de longueur, par l'inclinaison d'une aiguille dont Vicat notait les sinus.

Voici les résultats obtenus :

	VALEURS DU SINUS	
	LE 12 JUILLET 1831	LE 12 JUILLET 1832
Brin n°1 chargé au $\frac{1}{4}$ de la résistance à la rupture	15,0	0,0
2 $\frac{1}{3}$	70,0	67,0
3 $\frac{1}{2}$	97,5	107,0
4 $\frac{3}{4}$	157,5	149,0

Les aiguilles ayant été ramenées au zéro, le 12 juillet 1831, les sinus de la première colonne donnent les allongements pendant la première année et ceux de la seconde colonne les allongements pendant la seconde année.

Pendant la troisième année l'allongement continua à se produire de la même manière, mais le brin n° 4 se rompit le 15 avril 1833 dans une partie rouillée.

Les conséquences que Vicat a tirées de ses expériences, en calculant les allongements réels par mètre qui correspondent aux valeurs des sinus qu'il a observés, sont les suivantes :

1° Le fil tendu au $\frac{1}{4}$ de R, résistance à la rupture, a pris au début un très léger allongement et est ensuite resté absolument invariable.

2° Le fil tendu au $\frac{1}{3}$ de R s'est allongé de $2^{\text{mm}},75$ en 33 mois.

3° Le fil tendu au $\frac{1}{2}$ de R s'est allongé de $4^{\text{mm}},09$ en 33 mois.

4° Le fil tendu au $\frac{3}{4}$ de R s'est allongé de $6^{\text{mm}},13$ en 33 mois.

5° Pour les 3 derniers brins la vitesse d'allongement a été

constante pendant les trois années d'observation ; et, d'un brin à l'autre, elle a été proportionnelle à la charge, car on

$$a \text{ à très peu près } \frac{2,75}{(1/3)} = \frac{4,09}{(1/2)} = \frac{6,13}{(3/4)}.$$

Ces expériences établiraient un fait capital, si elles étaient exactes, c'est que la limite usuelle d'élasticité déterminée par des essais rapides n'est nullement absolue ; que non seulement des charges inférieures peuvent produire des allongements permanents, comme l'a prouvé Hodgkinson, mais qu'en outre, fait infiniment plus important, ces allongements, négligeables au début, acquièrent à la longue une importance redoutable par suite de leur accroissement continu.

EXPÉRIENCES DE M. THURSTON.

59. M. R. H. Thurston, professeur au Stevens Institut of Technology à Hoboken (New-Jersey), a fait des essais plus nombreux que Vicat. Malheureusement il a négligé de mesurer les allongements et n'a noté que la durée de l'action de la charge avant rupture. Voici les résultats qu'il a publiés.

Une série de fils de fer de Suède non recuits a été soumise à des charges variant entre $\frac{95}{100}$ et $\frac{55}{100}$ de la résistance normale, constatée par un essai rapide.

Une seconde série des mêmes fils préalablement recuits a été essayée de la même manière,

M. Thurston a obtenu les résultats suivants :

CHARGE EN TANT P. 100 de la résistance la rupture par chargement rapide	DURÉE DE CHARGEMENT QUI A PRODUIT LA RUPTURE	
	FIL NON RECUIT	FIL RECUIT
p. 100		
95	80 jours	8 minutes
90	85 —	5 —
85	17 mois sans rupture	1 jour
80	91 jours	266 —
75	17 mois sans rupture	17 —
70	—	455 —
65	—	455 —
60	—	17 mois sans rupture
55	—	—

La résistance normale du fil non recuit était à peu près double de celle du fil recuit, c'est tout ce que nous en savons. Quant aux limites d'élasticité, il n'en est pas question.

On sait toutefois (voir chap. V) que l'étirage à la filière n'élève pas seulement la résistance normale, mais bien plus encore la limite d'élasticité. D'après les résultats de nos essais, il est probable que, pour le fil non recuit, la limite d'élasticité était voisine des $\frac{80}{100}$ ou des $\frac{90}{100}$ de la résistance à la rupture et que pour le fil recuit elle différait peu des $\frac{55}{100}$ ou des $\frac{60}{100}$ de la résistance.

Si on admet ces chiffres, qui ne peuvent être éloignés de la vérité, on devra conclure des résultats obtenus par M. Thurston la loi suivante :

Tout effort supérieur à la limite d'élasticité produit la rupture en un petit nombre de mois au plus, que le métal soit écroui ou recuit. La rupture est d'ailleurs d'autant plus rapide que l'effort se rapproche davantage de la résistance à la rupture, constatée par un essai de peu de durée.

60. Conséquences des essais de Vicat et de M. Thurston.

— Les essais de M. Thurston tendent donc à prouver que les efforts supérieurs à la limite d'élasticité n'ont pas seulement pour effet de déformer le métal, mais en outre d'amener sa rupture par leur action prolongée.

Ce résultat serait fort important, s'il était définitivement acquis; mais il ne nous semble pas hors de contestation, et on peut se demander, si les ruptures de fils minces, qu'a obtenues l'observateur américain, n'ont pas été provoquées par la rouille, comme celle que Vicat a constatée après 33 mois.

Les résultats obtenus par Vicat auraient plus d'importance encore, car ils révéleraient un danger nouveau, résultant de l'allongement continu du métal sous des charges inférieures au tiers de la charge de rupture et à la moitié de la limite d'élasticité. Si ce fait était définitivement vérifié, il conduirait à un bouleversement complet des règles que l'on applique au calcul des dimensions des pièces métalliques.

Avant de tirer les conclusions qui ressortiraient des expériences de Thurston et de Vicat, nous avons cru devoir les contrôler, et nous avons commencé le 19 juillet 1884 des expériences de traction et de flexion qui nous permettront de nous rendre un compte exact des effets que produisent les efforts prolongés sur le fil de fer écroui, le fer recuit, le fil d'acier écroui et l'acier recuit.

Ces essais n'ont pas eu jusqu'ici une durée suffisante pour nous permettre de conclure avec certitude. Nous en rendrons compte ultérieurement et nous nous bornons aujourd'hui à dire qu'ils donnent des résultats fort différents de ceux que Vicat a cru remarquer. Si le fer et l'acier subissent des allongements continus sous l'action d'efforts inférieurs à la limite d'élasticité, ce qui ne nous paraît pas encore prouvé, il est en tous cas certain que ces allongements sont très inférieurs aux chiffres que Vicat a indiqués

et ne se produisent que pour des efforts plus considérables.

61. *Effet des efforts répétés un petit nombre de fois.* — Lorsqu'on fait agir sur une barre de fer ou d'acier des efforts croissant jusqu'à une valeur quelconque DM (fig. 15) supérieure à la limite d'élasticité, nous avons vu que la loi de sa déformation est représentée par la portion de courbe OLM et que, si on vient ensuite à supprimer l'effort, la barre se raccourcit de l'allongement élastique qui est égal à $DM \times 0,000046$ environ pour l'acier et à $DM \times 0,000050$ pour le fer.

Ce mouvement rétrograde est représenté par la ligne droite MC parallèle à OE, et le nouvel état du métal revenu à l'équilibre correspond au point C, qui indique une tension nulle et un allongement permanent OC.

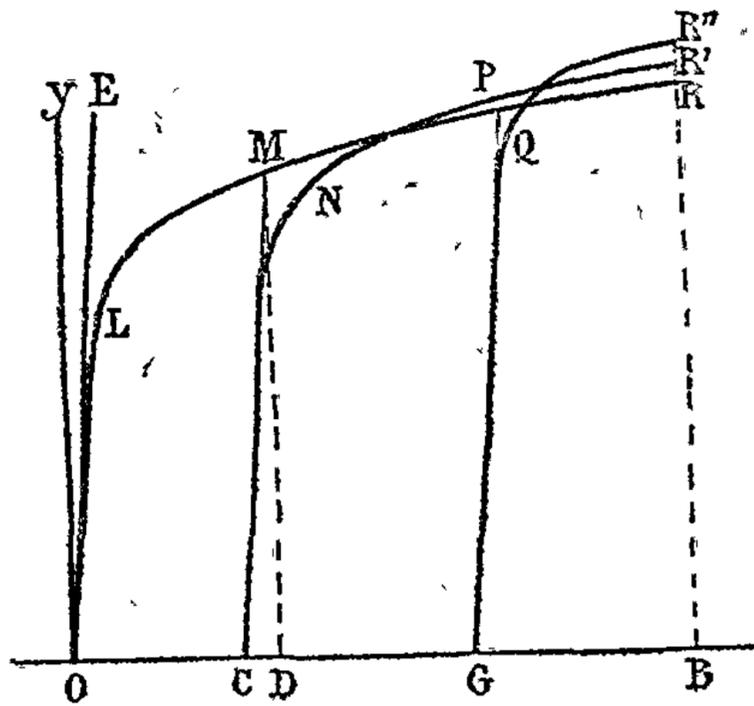


Fig. 15.

Si on recharge ensuite le même métal, on observe qu'il se conduit très sensiblement comme un métal nouveau (*) dont la limite d'élasticité serait presque égale à DM, valeur

(*) Expériences du colonel Ronet et de M. Lebasteur citées par ce dernier dans son ouvrage déjà indiqué.

de la tension précédemment subie et qu'il suit dans sa déformation nouvelle une courbe voisine du polygone curviligne CMR.

En augmentant suffisamment la charge pour produire la rupture de ce métal qui a subi deux tractions, on reconnaît que sa résistance est devenue un peu plus grande qu'elle ne l'était primitivement, mais que l'allongement qu'il peut prendre avant de se briser est réduit de OB à CB, de sorte que la nouvelle courbe de déformation du métal qui a subi précédemment un effort DM est la ligne CNR'.

Si on renouvelle plusieurs fois l'expérience, en soumettant le métal à des charges croissantes, il acquiert à chaque épreuve un léger supplément de résistance ; mais en revanche il perd de plus en plus la faculté de prendre un nouvel allongement, et par suite le travail de rupture dont il reste capable diminue à peu près de celui qu'il a précédemment subi.

M. le professeur Weyrauch cite une barre de fer essayée à Woolwich, dont la résistance a pris successivement les valeurs $35^k,20$ — $38^k,03$ — $39^k,78$ — $41^k,86$ par quatre chargements successifs, séparés par des retours à l'état d'équilibre. Il cite également un essai de M. Bauschinger, dans lequel la résistance du métal s'est élevée de $32^k,00$ à $44^k,00$ par sept chargements consécutifs.

Nous avons représenté dans la figure 15 les états successifs d'un métal, dont la courbe primitive serait OLR, et qui aurait été chargé trois fois. Un point qui aurait à chaque instant pour abscisse l'allongement total du métal et pour ordonnée la tension correspondante, suivrait pendant ces trois chargements et déchargements successifs la ligne OLMCNPGR". Par conséquent, dans le dernier chargement qui produit la rupture, ce métal se comporterait comme un métal nouveau ayant la ligne GR" pour courbe de déformation, c'est-à-dire plus élastique et plus résistant, mais beaucoup moins ductile et par suite plus cassant que le métal primitif.

62. *Effet des chocs répétés.* — On admet généralement que les chocs répétés altèrent peu à peu le métal par suite des vibrations qu'ils produisent. Nous traiterons ultérieurement ce sujet difficile, qui ne peut être éclairci que par des expériences. Mais nous voulons actuellement attirer l'attention sur l'effet que produisent les chocs répétés ayant une certaine intensité minimum et qu'une analyse très simple permet de prévoir.

Le travail résistant maximum, que le métal peut subir sans déformation permanente sensible, est ce que nous avons appelé le travail élastique. Il correspond à une tension maximum égale à la limite d'élasticité L et à l'allongement élastique corrélatif, que nous savons être de $0,000046 L$ environ pour l'acier par exemple. Sa valeur, égale à celle du triangle qui a cet allongement pour base et la tension L pour hauteur, est donc... $0,000023 L^2$.

Tout choc, dont la force vive par mètre de longueur et par millimètre carré de section de la barre choquée est supérieure à $0,000023 L^2$, produira donc une déformation permanente et une tension momentanée supérieure à la limite d'élasticité. Il fera décrire au point dont les coordonnées représenteraient à tout instant l'état du métal, une portion de la courbe de déformation telle que OLM (fig. 15) et produira par suite l'effet que nous avons décrit au paragraphe précédent, c'est-à-dire une augmentation de la limite d'élasticité et une diminution de la ductilité du métal.

Il est évident que, si la force vive du choc V est comprise entre $0,000023 L^2$ et $0,000023 R^2$, la déformation du métal cessera de s'accroître à un certain moment, où la limite d'élasticité acquise L' sera telle que l'on ait $V = 0,000023 L'^2$.

Si au contraire V est plus grand que $0,000023 R^2$, le travail élastique, dont le métal sera rendu capable par les augmentations successives de la limite d'élasticité, sera

toujours inférieur à la force vive du choc; les allongements ne cesseront donc jamais d'augmenter jusqu'au moment où ces déformations successives amèneront la rupture.

Pour un acier ayant 50 kilogrammes de résistance par exemple, la rupture sera forcément amenée par la répétition d'un choc développant une force vive égale à $0,000023 \times \overline{50^2} = 0,0575$. Et cependant, si ce métal a un allongement de rupture de 20 p. 100, on peut voir en construisant sa courbe de déformation, que, pour le briser d'un seul coup, il faudrait un choc produisant une force vive égale à 9,00 environ.

Pour un tel métal, il suffirait donc pour amener la rupture, d'un choc répété produisant une force vive environ 160 fois moindre que celle à laquelle il pourrait résister une seule fois.

On comprend que le danger des chocs répétés est bien plus considérable encore, si, au lieu d'une barre de section uniforme s'allongeant également dans toute sa longueur, il s'agit d'une barre percée de trous de rivets, comme presque toutes celles qui entrent dans les constructions, les sections entières d'une telle barre travaillant à un effort bien moins élevé que les sections affaiblies, et par suite ne prenant que de faibles allongements élastiques par l'effet du choc, qui force au contraire celles-ci à subir des allongements permanents. Par suite l'allongement total que peut prendre une telle barre avant de se rompre est bien moindre que celui dont est capable une barre à section uniforme; d'où il résulte que la force vive nécessaire pour produire la rupture par répétition est encore bien moins élevée pour les barres percées de trous de rivets que pour les barres à section constante, auxquelles s'applique le calcul que nous avons fait plus haut.

63. *Effet des efforts répétés un grand nombre de fois.* — S'il était facile de prévoir l'effet destructeur des chocs répétés, il n'en était pas de même de l'effet produit par la répétition des efforts appliqués sans choc. La lumière a été faite à ce sujet par les remarquables expériences dont nous allons résumer les résultats.

EXPÉRIENCES DE MM. VOEHLER ET SPANGENBERG.

64. *Nature des expériences.* — M. l'Ingénieur Woehler, qui dirige actuellement les chemins de fer de l'Alsace-Lorraine, a fait de 1859 à 1870 d'importantes expériences relatives à la résistance des métaux aux efforts répétés, et il en a rendu compte dans deux mémoires insérés en 1866 et 1870 dans la *Gazette de Berlin* (*).

Ses essais les plus importants se divisent en trois groupes.

Le premier comprend des barreaux ronds qu'on faisait tourner sous une charge permanente, en reproduisant ainsi ce qui se passe dans les essieux de chemins de fer. Les fibres extrêmes de ces barreaux travaillaient donc alternativement par traction et par compression à chaque rotation, et ces efforts contraires et successifs avaient une égale intensité.

Le second groupe comprend les essais de flexion exécutés sur des barreaux rectangulaires. Dans les uns la charge variait alternativement de zéro à un maximum déterminé, dans les autres la charge variait d'un minimum à un maximum de même signe.

Enfin le troisième groupe contient les résultats d'essais exécutés par traction directe.

65. *Appareils employés.* — Nous renvoyons aux mémoires originaux de M. Woehler, pour la description com-

(*) *Zeitschrift für Bauwesen.* Ernst et Korn, Berlin.

plète des appareils qu'il a employés; nous nous bornerons à en faire connaître le principe.

L'appareil qui a servi à faire les essais par rotation du premier groupe est si simple qu'il ne nécessite aucune explication. Le barreau rond tournait en supportant une charge constante.

Quant aux appareils employés pour les essais de flexion et de traction, ils reposent sur le même principe, et il suffira de donner une idée de celui qui a servi dans le dernier cas, en le réduisant à un diagramme théorique et en le dégageant des complications de détail et des leviers de renvoi destinés à permettre l'emploi de ressorts de faible puissance, pour équilibrer de grands efforts.

Un ressort à boudin vertical est attaché à un point fixe par son extrémité supérieure. Son extrémité inférieure supporte par l'une de ses têtes le barreau à essayer par traction.

A l'autre tête du barreau est suspendue une tige attirée en bas par un ressort capable de produire constamment l'effort minimum que l'on veut exercer. Dans cette tige est ménagée une rainure ou coulisse verticale.

Le ressort supérieur est d'avance tendu à l'effort maximum de traction que l'on veut expérimenter; un butoir l'empêche de revenir en arrière et ne lui permet que de se tendre davantage, si quelque effort supérieur à sa tension lui est appliqué par l'intermédiaire du barreau à essayer.

Un bouton de manivelle qui reçoit d'un arbre de transmission un mouvement alternatif vertical se meut dans la coulisse de la tige suspendue à la tête inférieure du barreau, et sa position est réglée de telle sorte qu'il n'appuie sur le fond de la coulisse qu'en arrivant au bas de sa course et de la quantité strictement nécessaire pour permettre de constater que l'extrémité inférieure du ressort a cessé un instant de s'appuyer sur le butoir qui l'empêche de revenir en arrière, et par suite, que le barreau d'essai a

exercé un moment sur le ressort et a supporté lui-même une tension égale à celle pour laquelle le ressort a été réglé.

Le barreau ne supporte donc à chaque tour l'effort maximum que pendant le temps très court où le ressort cesse de s'appuyer sur le butoir, et nous croyons pouvoir affirmer que cet intervalle est inférieur au $\frac{1}{10}$ de la durée du mouvement alternatif du bouton de manivelle.

Les transmissions employées par M. Woehler faisaient en moyenne 72 tours par seconde, de telle sorte que la durée de chaque action de l'effort maximum était environ de $\frac{1}{720}$ de minute ou de $\frac{1}{12}$ de seconde.

66. *Tableaux résumés.* — Nous avons choisi parmi les résultats des expériences de M. Woehler ceux qui sont les plus propres à mettre en relief les diverses conséquences qui en découlent, et nous les avons réunis en un tableau comprenant trois divisions, qui correspondent aux trois groupes indiqués plus haut.

ESSAI DE BARREAUX RONDS TOURNANT SOUS UNE CHARGE
CONSTANTE.

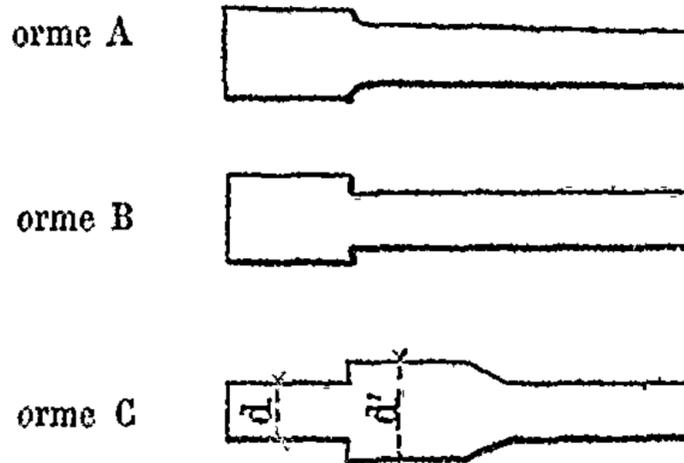


Fig. 16.

DÉSIGNATION du métal soumis à l'essai	FORME du barreau	Numéros d'ordre.	TENSION MAXIMUM des fibres calculée par la formule $T = \frac{Mn}{I}$		NOMBRE de répétitions qui ont amené la rupture.
			en centner par pouce carré.	en kilos par millimètre carré.	
Fer d'un essieu livré par le Phénix en 1857 (Résistance à la rupture. Valeur proba- ble 445 ^{er} par pouce carré, soit $R = 32,70$ par milli- mètre carré)?	A	1	cr.	kil.	rép.
		2	320	23,52	56 430
		3	300	22,05	99 000
		4	280	20,58	183 145
		5	260	19,11	479 490
		6	240	17,64	909 810
		7	220	16,17	3 632 588
		8	200	14,70	4 917 992
		9	180	13,23	19 186 791
Idem.	B	10	180	13,23	2 063 760
		11	160	11,76	14 695 000
Idem.	C	12	180	13,23	535 332
		13	160	11,76	1 386 072
		14	140	10,29	8 999 942
Acier d'un essieu livré par Krupp en 1862 (Résistance à la rupture. Valeur proba- ble 1040 ^{er} par pouce carré, soit $R = 76,40$ par milli- mètre carré.	A	15	320	23,52	642 675
		16	320	23,52	1 665 680
		17	300	22,05	45 050 640
Idem.	C	18	260	19,11	156 275 à 2 776 850 suivant la diffé- rence des diamè- tres d et d' .

Essai de barreaux à section rectangulaire soumis à des flexions répétées.

DÉSIGNATION du métal soumis à l'essai	NUMÉROS d'ordre	TENSION DES FIBRES EXTRÊMES calculée par la formule $T = \frac{Mn}{I}$				NOMBRE de répétitions qui ont amené la rupture.
		EN CENTNER par pouce carré		EN KILOS par millimètre carré		
		minimum	maximum	minimum	maximum	
Fer d'un essieu livré par le Phénix en 1857 R=32 ^k 70?	19	0	550	0	40,42	169 750
	20	0	500	0	36,75	420 000
	21	0	450	0	33,07	481 950
	22	0	400	0	29,40	1 320 000
	23	0	360	0	26,36	4 035 000
	24	0	320	0	23,52	non rompu après 3 420 000 répétit.
	25	0	300	0	22,05	non rompu après 48 200 000 répétit.
Acier d'un essieu livré par Krupp en 1863. Résistance inconnue.	26	0	520	0	33,22	1 477 400
	27	0	500	0	36,75	non rompu après 40 600 000 répétit.
Tôle d'acier livrée par Krupp R = 53,00.	28	0	600	0	44,10	420 100
	29	0	500	0	36,75	non rompu après 3 600 000 répétit.
Acier à ressort de Krupp livré en 1864 non trempé. Résistance inconnue.	30	0	1 000	0	73,50	39 950
	31	0	900	0	66,15	72 450
	32	0	800	0	58,80	132 650
	33	0	700	0	51,45	197 000
	34	0	600	0	44,10	468 200
	35	0	500	0	36,75	non rompu après 40 600 000 répétit.
	36	0	400	0	29,40	rompu après 32 942 000 répétit.
Idem.	37	156	1 000	12,20	73,50	62 000
	38	583	1 000	42,85	73,50	376 700
	39	660	1 000	48,50	73,50	19 673 300
Idem.	40	200	900	14,70	66,15	81 200
	41	500	900	36,75	66,15	1 238 900
	42	600	900	44,10	66,15	non rompu après 33 600 000 répétit.
Idem.	43	100	800	7,35	58,80	99 700
	44	300	800	22,05	58,80	2 135 670
	45	400	800	29,40	58,80	non rompu après 38 000 000 répétit.
Idem.	46	100	700	7,35	51,45	286 100
	47	200	700	14,70	51,45	701 800
	48	250	700	18,37	51,45	non rompu après 36 600 000 répétit.

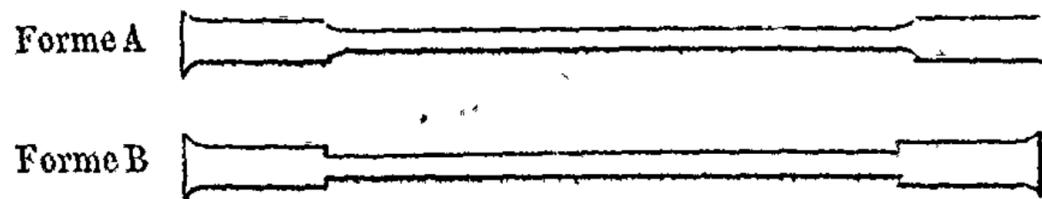
Essai de barreaux ronds soumis à des tractions répétées.

Fig. 17.

DÉSIGNATION du métal soumis à l'essai	FORME du barreau	NUMÉROS d'ordre	TENSION DES FIBRES EXTRÊMES calculées par la formule $T = \frac{T_n}{I}$				NOMBRE de répétitions qui ont amené la rupture
			EN CENTNER par pouce carré		EN KILOS par millimètre carré		
			minimum	maximum	minimum	maximum	
Fer d'un essieu livré par le Phénix en 1857. R = 32 ^k ,70 ?	A	49	0	480	0	35,28	800
		50	0	440	0	32,34	106 910
		51	0	400	0	29,40	340 853
		52	0	360	0	26,46	409 481
		53	0	360	0	26,46	480 852
		54	0	320	0	23,52	10 141 645
Idem.		55	200	440	14,70	32,34	2 373 424
		56	210	440	17,64	32,34	non rompu après 4 000 000 rép.
Idem.	B	57	0	360	0	26,46	37 828
Acier d'un essieu livré par Krupp.	A	58	0	800	0	58,80	18 741
		59	0	700	0	51,45	46 286
		60	0	600	0	44,10	170 170
		61	0	550	0	40,42	123 770
		62	0	480	0	35,28	non rompu après 13 600 000 rép.
Idem.		63	350	800	25,72	58,80	non rompu après 12 000 000 rép.
		64	0	360	0	26,46	208 883
		65	0	300	0	22,05	non rompu après 1 100 000 rép.

67. *Résultats des expériences.* — L'étude de ces tableaux fait reconnaître les faits suivants :

1° Les angles vifs diminuent la résistance des métaux aux efforts répétés. En prenant la moyenne des diverses expériences faites à ce point de vue par traction et par flexion,

on arrive à trouver que la diminution de résistance que produisent les angles vifs est de 20 p. 100 pour le fer dont sont fait les essieux et de 35 p. 100 pour l'acier d'essieux Krupp, qui avait une résistance de 76^k,40 et qui était par suite un métal dur et peu ductile.

Ces résultats, que nous avons déjà indiqués au paragraphe 16 sont d'accord avec ce que nous avons cru pouvoir conclure de déductions théoriques, car la contraction dans la striction $\frac{\sigma - S'}{\sigma}$ était égale à 0,31 pour le fer essayé et à 0,20 seulement pour l'acier Krupp, ainsi qu'on peut le calculer d'après les chiffres du tableau XIV du dernier mémoire de M. Woehler qui donne en regard les unes des autres les tensions de rupture de ces deux métaux, rapportées à la section primitive et à la section contractée. Ces chiffres prouvent bien que l'effet des angles vifs est d'autant plus intense que le métal prend moins de striction.

2° Les lignes 1 à 9 du premier tableau montrent qu'un fer dont la résistance à la rupture était égale à 32^k,70 s'est brisé à la longue par la répétition d'efforts très inférieurs à sa limite d'élasticité et agissant alternativement dans les deux sens opposés. La limite des efforts dangereux de cette nature a été trouvé de 11^k,70.

Plus l'effort répété dépasse ce chiffre de 11^k,70, plus est rapide la rupture. La loi est rendue sensible à l'œil par l'épure n° 18 qui a pour abscisses les valeurs des efforts et pour ordonnées les nombres de répétitions nécessaires pour produire la rupture.

Les lignes 15 à 17 du premier tableau montrent qu'il en est de même pour l'acier Krupp de 76^k,40 de résistance, et que la limite dangereuse, au point de vue des efforts répétés et de sens contraire, est voisine de 22 kilogrammes pour ce métal. Le second tableau donne pour les efforts de même sens des résultats analogues, mais des limites dangereuses très différentes.

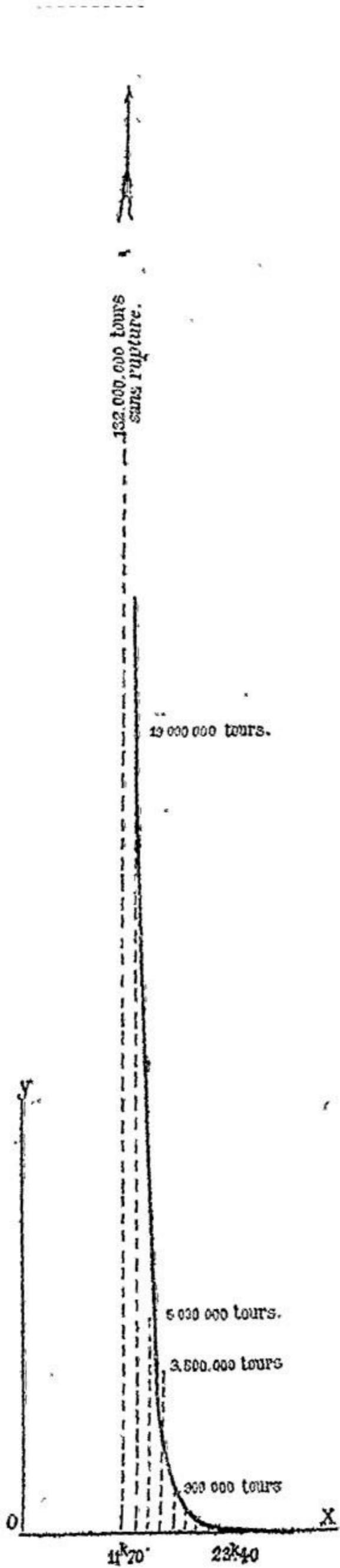


Fig. 18.

Les lignes 19 à 25 montrent d'abord que, pour les efforts de même sens, comme pour ceux de sens contraire, le nombre de répétitions nécessaire pour amener la rupture augmente rapidement quand la valeur de l'effort diminue, et qu'il tend vers l'infini, lorsque l'effort s'approche d'une certaine valeur qui a été trouvée égale à $22^k,05$ pour le fer.

Les lignes 26 et 27 montrent que cette limite dangereuse des efforts variant de zéro à une valeur déterminée a été égale à $36^k,75$ pour l'acier d'un essieu livré par Krupp en 1863 et dont nous ne connaissons pas la résistance normale à la rupture.

Les lignes 28 et 29 relatives à une tôle d'acier donnent des résultats incomplets, parce que le nombre de répétitions ne s'y est élevé qu'à 3 600 000, ce qui est insuffisant pour déterminer la valeur exacte de la limite des efforts dangereux. Il est cependant probable qu'elle est un peu inférieure à $36^k,75$ pour la tôle d'acier essayée qui avait 53 kilogrammes de résistance normale.

Les lignes 30 à 48 du second tableau contiennent les résultats d'expériences faites sur des aciers à ressorts non trempés livrés par Krupp; elles sont extraites d'un tableau plus étendu, qui comporte 48 essais.

On y verra qu'un acier, qui ne pouvait supporter qu'un effort de flexion de 30 à 40 kilogrammes, lorsque les répétitions étaient séparées par des retours à l'équilibre, a pu supporter sans se rompre la répétition en quelque sorte indéfinie d'un effort calculé

variant de. . . .	$18^k,37$ à $51^k,45$
ou encore de . .	$29^k,40$ à $58^k,80$
—	$44^k,10$ à $66^k,15$
et même de. . .	$48^k,50$ à $73^k,50$.

Nous ignorons quelles étaient la limite d'élasticité et la charge de rupture de ces aciers; mais ces essais n'en mettent pas moins en évidence ce fait remarquable que le

maximum de l'effort a pu, sans amener la rupture, atteindre une valeur d'autant plus forte que le minimum était lui-même plus élevé.

Le troisième tableau donne le résultat des essais peu nombreux qui ont été faits par traction.

Le fer d'essieux s'est rompu après 10 141 645 répétitions d'un effort variant de 0 à 23^k,52 et a supporté sans se rompre 4 000 000 de répétitions d'un effort variant de 17^k,64 à 32^k,34.

L'acier d'un essieu Krupp a supporté sans se rompre la répétition d'un effort variant de 0 à 35^k,28 et d'un effort variant de 25^k,72 à 58^k,80.

68. *Lois de M. Woehler.* — De ces résultats M. Woehler a tiré les conclusions suivantes :

« Il y a accord entre les résultats obtenus par traction
« et par flexion. Ils prouvent que l'effort peut varier avec le
« même degré de sécurité, qui peut être regardé comme
« absolu :

Pour le fer d'essieux :

D'une pression de 11 ^k ,70	à une tension de 11 ^k ,70	par millimètre carré.	
—	0	—	23,40 —
D'une tension de 17,50	—	—	32,20 —

Pour l'acier d'essieux Krupp :

D'une pression de 22 ^k ,00	—	22 ^k ,00	—
—	0	—	56,00 —
D'une tension de 26,00	—	60,00	—

Pour l'acier à ressorts non trempé :

D'une tension de 0	—	37,00	—
—	18,75	—	52,00 —
—	30,00	—	60,00 —
—	45,00	—	67,50 —

La plupart des auteurs allemands qui se sont occupés de ces chiffres les ont acceptés comme absolument démontrés, non seulement dans leur sens général, mais dans leurs

valeurs exactes, et en ont tiré des conclusions applicables aux grandes constructions. Nous les discuterons dans une seconde note, et nous nous bornerons pour le moment à quelques observations sur les expériences elles-mêmes.

69. *Irrégularité des métaux essayés.* — La première est que les lois que M. Woehler a formulées résultent de la comparaison des résultats obtenus sur des barreaux différents et qu'elles ne seraient bien établies, que si les barreaux essayés étaient d'une qualité identique. Or tous ceux qui ont l'habitude du métal savent qu'il n'y a pas d'homogénéité dans une pièce forgée telle qu'un essieu, et qu'on obtiendra des résistances et des allongements fort différents sur des barreaux pris dans le même essieu à la fusée, à la portée ou au corps, ou même en des points différents d'une même partie. Les essieux sont donc mal choisis pour des essais comparatifs; ils ne donnent pas l'identité de qualité qu'on ne trouve que dans les barres laminées. Par suite les essais d'une même série des expériences de M. Woehler ne sont pas rigoureusement comparables, lorsqu'ils ont porté sur du métal d'essieux.

Nous reconnaissons toutefois que ces différences de qualité ne peuvent pas avoir une très grande importance dans une série comprenant des barreaux découpés dans un même essieu; mais il n'en est pas de même lorsqu'on veut comparer les résultats d'essais faits sur des essieux différents, comme M. Woehler est obligé de le faire pour établir les lois qu'il énonce. Dans une même livraison on trouve des essieux dont la résistance diffère de 15 à 20 p. 100, et on peut à plus forte raison en trouver dans des livraisons différentes, ainsi que cela résulte d'ailleurs des chiffres obtenus par M. Woehler lui-même, qui a trouvé 64 kilogrammes de résistance et 33 p. 100 de contraction pour l'acier d'un essieu livré par l'usine Krupp en 1853 et 76^k,40 de résistance avec 20 p. 100 de contraction pour un essieu livré en 1862 par la même usine.

On ne peut donc regarder comme correspondant à des métaux identiques les chiffres que M. Woehler donne pour les limites dangereuses dans le cas des efforts contraires et dans celui des efforts de même sens, et la comparaison qu'on en fait ne donne pas des conclusions rigoureusement établies.

Il aurait été d'autant plus indispensable d'indiquer pour chaque essai de répétition les caractéristiques du métal essayé L , R , a et C , que ce sont les seuls chiffres que peut déterminer rapidement l'Ingénieur, qui doit se rendre compte de la qualité d'un métal. C'est en fonction de ces éléments qu'il eût fallu définir les limites dangereuses au point de vue de la répétition des efforts.

70. *Faible durée des efforts maxima.* — La seconde réserve que nous faisons aux expériences de M. Woehler a trait au mode d'essai qu'il a adopté. Nous avons vu que, par suite de la disposition de ses appareils, la durée de l'action des efforts maxima était voisine de $\frac{1}{12}$ de seconde, et la suite de ce travail prouvera que cette durée est insuffisante pour que l'effort produise son plein effet au point de vue de la déformation et par suite de l'altération du métal. Si donc les essais de M. Woehler permettent de déterminer les limites dangereuses des efforts répétés pour les pièces soumises à des variations ayant une rapidité analogue à celle qu'il a réalisée dans ses appareils, ils ne donnent pas de renseignements certains pour les pièces soumises à des variations moins rapides, dont l'altération commencerait vraisemblablement pour des efforts moins élevés.

Nous ne faisons qu'indiquer ce point, auquel nous reviendrons, lorsque nous aurons acquis les notions préalables sans lesquelles on ne peut le discuter utilement.

71. *Emploi erroné de la formule de la flexion.* — Enfin nous ferons aux chiffres donnés par M. Woehler une troisième réserve, qui est la conséquence de l'étude de la flexion que nous avons faite au chapitre III.

Les essais par traction sont en fort petit nombre dans le travail de M. Woehler, et c'est en somme sur les essais de flexion qu'il a dû baser ses conclusions. Or il a calculé les tensions de fibres inscrites dans ses tableaux d'après la valeur des moments de flexion, en employant la formule

$T = \frac{Mz}{I}$, et nous avons vu qu'elle donne des résultats,

dont l'inexactitude, notable au-dessous de la limite d'élasticité, devient très forte dès qu'on la dépasse. Il en résulte que les valeurs des tensions, que M. Woehler a déduites de ses essais de flexion, sont entachées d'erreurs d'autant plus fortes qu'elles sont elles-mêmes plus élevées.

Alors même que le bien fondé de cette critique ne résulterait pas suffisamment de notre étude de la flexion, il serait mis hors de doute par la discussion des chiffres obtenus par M. Woehler lui-même. Nous voyons en effet à la ligne 19 du deuxième tableau qu'un fer, dont la résistance normale à la rupture était égale à $32^k,70$, a supporté 169 750 répétitions d'une flexion produisant une tension calculée de $40^k,42$. Or il est évidemment inadmissible qu'un métal ait supporté un si grand nombre de fois la répétition d'un effort qui dépasse de près de 8 kilogrammes celui dont une seule application suffit pour amener la rupture en quelques secondes. Le chiffre calculé de $40^k,42$ est donc forcément exagéré.

Pour calculer exactement l'erreur commise, il faudrait connaître la courbe de déformation particulière du métal essayé. Faute de ce renseignement, nous avons fait un calcul approximatif, en supposant à cette courbe une forme semblable à celles que nous ont données des métaux de résistance analogue, et nous avons reconnu que, lorsque M. Woeh-

ler a indiqué $73^k,50$ par exemple pour valeur de la tension que l'acier à ressort aurait supportée (ligne 39), il ne travaillait en réalité qu'à une tension de 58 kilogrammes environ. On voit que la différence vaut la peine qu'on s'y arrête et que, si elle laisse debout le sens général des résultats obtenus par M. Woehler, elle ne permet pas de considérer comme exactes les valeurs de toutes les limites dangereuses qu'il a déduites de ses essais de flexion. Toutefois cette critique n'atteint pas les valeurs déterminées pour les limites dangereuses des efforts de sens contraire, qui, étant très inférieures à la limite d'élasticité, ont pu être calculées avec une exactitude presque parfaite par la formule de la flexion.

On ne peut tirer que des conclusions bien incertaines des essais de traction consignés au troisième tableau, d'abord parce qu'ils sont très peu nombreux, et ensuite parce qu'il est probable qu'ils n'ont pas porté sur le même métal que les essais de flexion, bien que le fer soit indiqué dans les deux cas comme provenant d'essieux livrés en 1857 par le Phénix. L'irrégularité du métal essayé est prouvée par ce fait qu'un barreau aurait supporté 800 répétitions d'un effort de $35^k,28$, alors qu'un barreau portant la même désignation s'est brisé par une seule application d'un effort de $32^k,70$, ainsi qu'il résulte du quatorzième tableau inséré dans le dernier mémoire de M. Woehler.

72. *Essais de M. Spangenberg.* — Nous croyons donc, que, vu l'incertitude qui subsiste au sujet de l'identité des métaux essayés par traction et par flexion, on ne peut rien conclure de certain des essais de M. Woehler au point de vue de la résistance comparative du fer et de l'acier dans ces deux modes de déformation. Mais on trouve des renseignements précis sur ce sujet dans les essais exécutés par M. Spangenberg, continuateur des travaux de M. Woehler, qui a fait des expériences comparatives sur des

métaux identiques. Nous en extrayons les chiffres indiqués au tableau suivant :

DÉSIGNATION du MÉTA	ESSAIS DE TRACTION			ESSAIS DE FLEXION		
	TENSION DES FIBRES		NOMBRE de répétitions qui a amené la rupture	TENSION DES FIBRES calculée par la formule $T = \frac{Ma}{I}$		NOMBRE de répétitions qui a amené la rupture
	EN CENTNER par pouce carré	EN KILOG. par millimètre carré		EN CENTNER par pouce carré	EN KILOG. par millimètre carré	
Fer de Westphalie.	480	35,28	4,700	475	34,91	612065 457229 799543 1493511 3587509
	400	29,40	136,700	450	33,07	
	360	26,46	180,800	425	31,24	
	360	26,46	596,000	400	29,40	
	32	23,52	280,121	360	26,46	
	320	23,52	566,344			
sup.	640	47,04	81,400	575	42,26	443800 423400 513000 11774000 11851000 non rompu
	500	36,75	429,000	550	40,42	
				525	38,59	
				500	36,75	
				475	34,91	
450	33,07					
Bronze ordinaire .	200	14,70	0	200	14,70	102650 151310 837760 non rompu après 10400000 répét.
	200	14,70	4,200			
	150	11,02	6,300			
	100	7,35	5447,600			
Bronze phosphor.	250	18,37	147,850	200	14,70	862980 8151811 5075160 non rompu après 10000000 répét.
	200	14,70	408,350			
		11,02	2731,161			
		9,19	2340,000			
o.	200	14,70	0	200	14,70	253100 1931000 non rompu après 5600000 répét.
	150	11,02	0			
	100	7,35	53,000			

Les essais de M. Spangenberg sont malheureusement incomplets. Tous les efforts essayés par traction ont amené rapidement la rupture et n'ont pas permis par suite de déterminer exactement les limites dangereuses, auxquelles ils étaient supérieurs. Au contraire dans chaque série de flexions, sauf dans la première, on est arrivé à déterminer la limite dangereuse. Les résultats obtenus sont néanmoins significatifs.

Ainsi, pour le fer de Westphalie essayé, la limite dangereuse de traction doit être très notablement inférieure à $23^k,52$, effort qui a amené la rupture après 566 344 répétitions, tandis que celle de flexion est très voisine de $26^k,46$, effort qui n'a produit la rupture qu'après 3 587 509 répétitions.

Pour l'acier Krupp les essais de traction ont été trop peu nombreux pour permettre de fixer la valeur de la limite dangereuse; mais on voit que le même effort de $36^k,75$ a été supporté 429 000 fois par traction et 11 774 000 fois, soit 27 fois plus, par flexion.

Des différences analogues se remarquent pour les bronzes, mais c'est pour le cuivre rouge que les résultats obtenus sont les plus remarquables. Tandis que ce métal n'a pas pu supporter une seule fois un effort de $11^k,02$ agissant par traction, il a supporté 5 600 000 fois, sans se rompre un effort calculé identique, agissant par flexion.

Nous ferons remarquer, une fois de plus à ce sujet que l'expérience vérifie bien la relation que nous avons établie entre la striction et la supériorité de la résistance à la flexion sur la résistance à la traction. En effet cette supériorité est surtout énorme pour le cuivre rouge, dont on connaît la remarquable ductilité, et elle est minimum pour le bronze phosphoreux, qui est un métal à grande résistance et à faible striction.

Il n'y aurait d'exception à cette loi que pour la fonte, dont la supériorité de résistance à la flexion est produite par

des causes un peu différentes que nous avons indiquées au chapitre III.

M. Spangenberg a également essayé des aciers de Firth and Sohn, mais l'irrégularité enlève toute valeur aux résultats qu'ils ont fournis et dont les uns donnent l'avantage à la flexion, tandis que d'autres sont en faveur de la traction.

En somme il résulte des essais de M. Spangenberg, qu'il n'y a pas identité entre les limites dangereuses de traction et de flexion, lorsque celles-ci sont calculées par la formule usuelle. C'est une des raisons que nous avons fait valoir au chapitre III en faveur de l'adoption d'un coefficient de travail plus élevé pour la flexion que pour la traction, les tensions produites dans la flexion devant être, comme par le passé calculées au moyen de la formule $T = \frac{Mn}{I}$, la seule dont on dispose.

73. *Valeur des lois de M. Woehler.* — Bien que nous ayons fait plusieurs réserves importantes au sujet des expériences de M. Woehler, nous pensons qu'elles ont néanmoins une grande valeur; car on doit remarquer que l'erreur commise dans le calcul des tensions de flexion a eu pour résultat d'exagérer les valeurs des limites dangereuses. L'extrême brièveté de l'action des efforts, qui rend leur effet incomplet et moins destructeur, concourt au même résultat que l'erreur en question; comme elle, elle conduit à assigner aux limites dangereuses des valeurs trop élevées.

Par conséquent, le danger spécial résultant de la répétition des efforts, que M. Woehler a découvert et mis hors de doute est plus pressant encore qu'il ne l'a pensé, et des expériences comparatives, plus précises, ne pourront que faire apparaître plus étroites encore les limites dans lesquelles doivent être renfermés les efforts répétés, pour ne pas altérer le fer et l'acier.

Si donc, il est fort désirable que des expériences nouvelles

soient faites, il serait illogique d'en attendre le résultat pour tenir compte du danger désormais indiscutable qui résulte des efforts répétés. Nous verrons dans une autre étude à quelles règles de calcul on arrive en tenant compte de l'importance réelle de ces nouvelles lois, qui nous semblent pouvoir se résumer ainsi, en ne conservant que ce qui ressort réellement des faits et en mettant de côté les chiffres précis dont l'exactitude est contestable.

« La répétition des efforts est pour les métaux une cause
« spéciale d'altération, dont l'effet n'est nullement propor-
« tionnel à la valeur absolue du maximum de l'effort.

« Le cas le plus défavorable à la durée du métal est celui
« où l'effort varie entre deux valeurs égales et opposées,
« c'est-à-dire entre une tension et une pression d'égale
« intensité. La limite dangereuse de répétition est alors très
« inférieure à la limite d'élasticité et probablement voisine
« de la moitié de cette quantité, lorsque la durée des efforts
« maxima est de $\frac{1}{12}$ de seconde environ, comme dans les es-
« sais de M. Woehler.

« Lorsque l'effort varie de zéro à un maximum constant
« et toujours de même signe, la limite dangereuse de ré-
« pétition est voisine de la limite d'élasticité, si la durée
« des efforts conserve la même valeur de $\frac{1}{12}$ de seconde.

« Lorsque l'effort varie d'un minimum à un maximum
« de même signe, la limite dangereuse s'élève et dépasse
« d'autant plus la limite d'élasticité, que le minimum est
« lui-même plus élevé.

« Les limites dangereuses des efforts de même sens
« sont moins élevées pour la traction que pour la flexion,
« les efforts de flexion étant calculés par la formule usuelle

$$« T = \frac{Mz}{I}. »$$

74. *Détermination empirique des dimensions des pièces de remplacement.* — Indépendamment de l'importance qu'ils ont au point de vue du calcul théorique des dimensions des constructions, les résultats des expériences de M. Woehler donnent la solution empirique d'un problème que l'Ingénieur dirigeant un outillage mécanique a fréquemment à résoudre.

Un organe de machine s'est brisé après un temps de service plus ou moins long; l'examen de la cassure prouve que le métal était de bonne qualité, et le calcul établit que les efforts que l'on peut calculer ne dépassaient pas les limites ordinaires. Il faut donc conclure que l'organe en question était soumis à des effets d'inertie, à des chocs ou à des vibrations qui échappent au calcul, et que par suite la théorie pure est impuissante pour déterminer les dimensions qu'il convient de donner au nouvel organe, afin de lui assurer une durée indéfinie.

Le cas dont il s'agit n'est pas l'exception, mais peut-être plutôt la règle ordinaire en mécanique, et nous croyons qu'en général les calculs usuels donnent des valeurs extrêmement erronées pour la fatigue des pièces de machines. Nous en avons vu des exemples nombreux et frappants.

Il y a donc là un problème important, et on en trouve la solution dans les essais de M. Woehler. En effet, supposons que la pièce en question se soit brisée après n tours ou répétitions de l'effort. On cherchera dans les tableaux de M. Woehler un barreau de même métal, qui ait résisté à n répétitions d'un effort de même nature, et on notera la charge P qui a amené sa rupture. On trouvera dans la même série d'essais la charge p qu'un barreau identique a pu supporter indéfiniment sans se briser, et le rapport $\frac{p}{P}$ indiquera évidemment la proportion dans laquelle on doit diminuer la fatigue de la pièce remplacée pour lui assurer une durée indéfinie.

Si donc il s'agit d'une pièce travaillant par traction ou compression directe, on devra augmenter sa section dans le rapport $\frac{P}{p}$; s'il s'agit d'une pièce résistant par flexion, c'est le facteur $\frac{I}{n}$ du moment résistant $M = \frac{RI}{n}$ qu'il faudra augmenter dans le même rapport.

La solution serait absolument exacte, si on avait des essais assez nombreux faits pour toutes les natures de fer et d'acier et pour tous les genres d'efforts. En fait, les essais de M. Woehler par traction ou par flexion d'un seul côté sont trop peu nombreux pour en tirer des chiffres certains. Mais il n'en est pas de même des essais par rotation sous charge constante qu'il a faits en très grand nombre, et on peut en déduire des règles certaines pour la catégorie la plus intéressante des pièces mécaniques, celle des arbres ou axes de tous genres, pourvu qu'ils soient faits en métal identique à l'un de ceux que M. Woehler a étudiés.

Le tableau ci-après donne pour les axes, en regard du nombre de tours qui a amené la rupture, le rapport $\frac{P}{p}$, c'est-à-dire l'augmentation de force qu'il faut donner à la pièce en remplacement pour qu'elle dure indéfiniment.

NOMBRE DE TOURS qui a amené la rupture de la pièce à remplacer	AUGMENTATION DE FORCE QU'IL FAUT DONNER à la pièce, suivant qu'elle est en	
	FER	ACIER MI-DUR
50 000 tours	1,90	1,45
100 000 —	1,80	1,30
500 000 —	1,60	1,20
1 000 000 —	1,40	1,15
2 000 000 —	1,30	1,10
5 000 000 —	1,20	1,06
10 000 000 —	1,05	1,02

Les chiffres du tableau qui précède mettent en évidence une différence entre l'acier mi-dur et le fer, qu'on ne pouvait pas soupçonner; c'est que le premier de ces deux métaux fera bien moins de service que le second, si on dépasse dans la même proportion l'effort auquel il peut résister indéfiniment. Ainsi, une pièce d'acier mi-dur, dont la force sera les $\frac{1}{1,30}$ par exemple de celle qui assurerait sa durée indéfinie, ne résistera qu'à 100 000 efforts, tandis qu'une pièce de fer réduite dans la même proportion résistera à 2 000 000 efforts. Le danger qu'il y a à donner des dimensions insuffisantes à une pièce est donc plus grand pour l'acier mi-dur que pour le fer.

En revanche, lorsqu'une pièce d'un tel acier se brise, pour assurer à celle qui la remplace une durée indéfinie, il suffit d'une augmentation de force bien moins grande que s'il s'agissait d'une pièce de fer.

Il est clair que ce qui précède suppose que le remplacement a lieu en métal de même nature, et qu'on augmenterait beaucoup les chances de durée en substituant l'acier au fer. Les essais de M. Woehler permettent de prévoir le résultat de ce changement, en admettant toutefois que le fer et l'acier employés soient comparables à ceux qu'il a expérimentés et dont les résistances normales de rupture étaient de 33 et 76 kilogrammes environ. Ils montrent que dans le cas de la rotation, une pièce d'acier remplaçant une pièce de fer, et de même dimension, aura des chances de durée indéfinie, si la pièce de fer a résisté à 100 000 tours au moins avant de se briser. Si elle s'est rompue plus tôt, il ne suffira pas de changer le métal, il faudra en même temps augmenter les dimensions.

Nous ne prétendons pas donner ces chiffres comme absolus, parce que les métaux dont on disposera différeront en général de ceux qui ont servi aux expériences; mais ils donneront, en tout cas, une approximation bien pré-

férable à l'ignorance absolue, où s'est trouvé jusqu'à présent le constructeur dans les cas trop nombreux où l'analyse la plus savante est impuissante à calculer l'effet des efforts si compliqués qui se produisent dans la pratique.

CHAPITRE V.

INFLUENCE DU MODE DE FABRICATION ET DES ACTIONS MÉCANIQUES SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'ACIER ET DU FER.

75. *Pièces moulées.* — L'acier coulé présente une structure cristalline d'autant plus marquée, qu'il s'est refroidi plus lentement, et plus apparente par suite dans les pièces moulées dans le sable que dans celles qui sont coulées en lingotières.

L'acier coulé a une résistance qui, bien qu'inférieure à celle de l'acier laminé ou forgé, est au moins double de celle de la fonte. Son allongement à la rupture est extrêmement irrégulier et varie d'un point à l'autre d'une même pièce, mais il est également supérieur à celui de la fonte.

On peut obtenir 40 kilogrammes de résistance et 1,0 à 5,00 p. 100 d'allongement permanent des aciers moulés de bonne qualité essayés à l'état naturel.

Le recuit rend moins cristalline la structure de l'acier coulé et augmente son allongement. Par exception à la règle habituelle, il augmente aussi sa résistance. On peut compter pour les aciers coulés et recuits de dureté moyenne sur 45 à 50 kilogrammes de résistance à la traction et sur 3 à 8 p. 100 d'allongement. Ces aciers ont donc un avantage considérable sur la fonte, dont la résistance est en général de 10 à 20 kilogrammes avec un allongement insignifiant.

La trempe suivie d'un recuit améliore énormément l'acier

moulé et lui donne des qualités très voisines de celles de l'acier forgé ou laminé, et on constate que la structure du métal change en même temps que ses propriétés mécaniques. De cristalline, elle devient amorphe, finement grenue, et à peu près identique à celle du métal laminé.

On peut obtenir par la trempe et le recuit des aciers moulés donnant 45 kilogrammes avec 20 p. 100 d'allongement ou 60 kilogrammes avec 12 p. 100 d'allongement.

Malheureusement la trempe ne paraît applicable qu'aux petites pièces moulées, présentant des formes régulières sans variations brusques de section ; son emploi est donc limité à des cas exceptionnels, et en pratique on ne dispose habituellement que de l'acier recuit, pour lequel il serait imprudent de compter sur une résistance supérieure à 45 ou 50 kilogrammes par millimètre carré. Toutefois ce métal a encore une telle supériorité sur la fonte qu'il est difficile de s'expliquer pourquoi il n'a pas reçu plus d'applications dans les grandes constructions. Il reste à son égard une défiance qui ne nous semble pas justifiée et que ne partagent pas les métallurgistes, habitués qu'ils sont à remplacer la fonte par l'acier moulé, partout où le premier de ces métaux ne résiste pas. Ils ont reconnu, depuis bien des années, que l'acier moulé, alors même qu'il renferme des soufflures, présente une grande supériorité sur la fonte, au triple point de vue de l'usure, de la fragilité et de la résistance.

On peut obtenir de l'acier sans soufflures, par la compression, ou plus facilement par le procédé de Terrenoire, qui consiste dans l'addition de silicium et de manganèse à la fin de l'opération. On doit y recourir pour les pièces qui comportent des surfaces de frottement, ou qui doivent être imperméables ; mais nous pensons, qu'en dehors de ces cas assez rares, il vaut mieux tolérer quelques soufflures, plutôt que d'employer les aciers siliciés qui, pour n'être pas cassants, doivent être dosés avec une précision presque mathématique. L'expérience a prouvé que, si les souf-

flures, ont l'inconvénient de donner aux pièces un mauvais aspect, elles n'exercent pas d'influence fâcheuse sur leur solidité, lorsqu'elles n'ont pas une importance excessive.

On en tient compte en réduisant de $\frac{1}{8}$ environ les efforts imposés au métal.

Si l'acier moulé peut recevoir de nombreuses applications dans les constructions, c'est cependant à coup sûr l'acier laminé qui y prendra la plus grande place. La description et la théorie du laminage seraient déplacées dans cette note, nous n'en exposerons que ce qu'il importe aux Ingénieurs de connaître.

76. *Fer laminé.* — Nous avons vu que le fer cinglé et laminé en barres brutes au sortir du four à puddler retient des scories interposées. La tôle ou la barre marchande que l'on obtient en laminant un paquet formé de mises de ce fer brut superposées et soudées au four, contient encore des scories, mais en quantité bien moindre que le fer brut. Si on prend des barres provenant de cette seconde opération, et, si on en forme un nouveau paquet, il donnera par le soudage et le laminage un fer encore plus pur et plus homogène, ayant plus de ténacité et plus de régularité. La plupart des Compagnies de chemins de fer exigent ce mode de fabrication pour les essieux de wagons; mais, vu les frais élevés qu'il entraîne, on ne l'emploie pas pour les tôles et barres destinées aux grandes constructions.

Plus le laminage dans un sens est prononcé, plus on a de résistance et d'allongement dans ce sens, et moins on en a dans l'autre. Ainsi une tôle laminée avec 2 mètres de longueur sur 2 mètres de largeur peut présenter une résistance et un allongement égaux dans les deux sens, tandis qu'une tôle laminée à 8 mètres de longueur sur 1 mètre de largeur aura beaucoup plus de résistance et d'allongement en long qu'en travers, et il en sera de même à un degré

encore plus marqué dans une barre ou une cornière de grande longueur. Il importe de ne pas perdre de vue ce fait dans la rédaction des cahier des charges et des projets. Pour les tôles de fer très longues, la différence de résistance dans les deux sens peut atteindre 20 p. 100 et la différence d'allongement 50 à 75 p. 100.

77. *Acier laminé.* — Pour l'acier on peut dans la pratique négliger la différence de résistance résultant du sens de laminage, qui ne dépasse pas 3 à 6 p. 100, sauf pour les aciers phosphoreux, auxquels leur structure feuilletée semble donner des propriétés plus voisines de celles du fer. Au contraire la température à laquelle est fait le laminage exerce sur les propriétés de l'acier une influence plus considérable encore que sur celles du fer. Nous allons en indiquer la nature.

Un lingot d'acier supporte sans être détérioré une température d'autant plus élevée qu'il est moins dur. Les aciers extra-doux contenant de 0,12 à 0,15 p. 100 de carbone peuvent être chauffés impunément au blanc comme le fer, tandis que les aciers à rails renfermant 0,50 à 0,60 p. 100 de carbone ne doivent pas être chauffés au delà du jaune orange. Si on dépasse cette température, on s'approche du point de fusion, qui est moins élevé pour les aciers durs que pour les aciers peu carburés, la cohésion du métal devient trop faible et le lingot tombe en débris sous la première pression du laminoir.

Le laminage doit être terminé à une température aussi voisine que possible du rouge vif ou au moins du cerise clair. S'il cesse à une température plus élevée, le métal n'acquiert pas toute la ténacité dont il est susceptible et garde encore des traces de la structure cristalline qui caractérise les lingots non corroyés. Ce danger n'existe toutefois que pour les pièces de grande épaisseur, qui conservent une température élevée pendant qu'on les travaille. En

pratique, c'est l'inverse qui arrive le plus souvent ; le laminage n'est pas terminé au moment où la barre passe par le rouge cerise clair et on le continue jusqu'au rouge cerise sombre, parfois pour les tôles minces jusqu'au noir. Alors le métal acquiert une grande résistance aux dépens de sa faculté d'allongement. Mais ce qu'il y a de plus caractéristique, c'est l'augmentation du rapport de la limite d'élasticité à la charge de rupture qui se produit en même temps, et la fragilité au choc qui l'accompagne.

78. *Recuit.* — Le recuit fait disparaître complètement cette espèce d'écrouissage résultant d'un laminage à une température trop basse, que l'on reconnaît au seul aspect de la tôle nouvellement fabriquée, par la coloration rougeâtre de sa surface, fort différente de la teinte bleuâtre des fers et des aciers laminés à bonne température.

Nous ne citerons qu'un exemple de l'effet si connu du recuit. Une tôle mince a donné pour

valeurs de	L	R	a	$\frac{L}{R}$
avant recuit	48 ^k ,6	58 ^k	9 p. 100	0,84
après recuit	23,2	47,4	16,5 p. 100	0,49.

On se rendra compte de l'importance de cette différence, lorsque nous examinerons le rôle du rapport $\frac{L}{R}$ au point de vue de la sécurité que présentent les constructions.

79. *Écrouissage.* — L'altération qu'éprouve le métal lorsqu'on termine le laminage ou le forgeage à une température trop basse n'est qu'un cas particulier du phénomène connu sous le nom d'écrouissage que nous définirons de la manière suivante :

Lorsqu'un métal (fer ou acier) subit un travail de déformation quelconque à une température inférieure au rouge cerise, sa charge de rupture augmente en général, et sa

limite d'élasticité augmente toujours d'une quantité plus forte, de sorte que le rapport $\frac{L}{R}$ devient lui-même plus élevé. En même temps l'allongement que le métal est capable de supporter avant de se rompre diminue d'une quantité relativement plus grande que l'augmentation de la charge de rupture. Il en résulte une diminution du travail de déformation que le métal peut supporter avant la rupture. C'est cette modification d'état qui a reçu le nom d'écrrouissage.

Lorsque la déformation est simplement produite par l'application d'un effort de traction, l'énoncé qui précède est la conséquence évidente de ce que nous avons dit au paragraphe 61.

Lorsque l'écrrouissage est produit par une compression simple, ou par un laminage à froid, l'augmentation de résistance devient importante et est toujours accompagnée d'une augmentation de $\frac{L}{R}$ et d'une diminution de α .

Voici les résultats d'essais que nous avons faits :

DÉSIGNATION DU MÉTAL	VALEURS DE			
	L	R	$\frac{L}{R}$	α
Acier extra-doux essayé à l'état naturel.	25,3	42,5	0,59	26,5
Le même comprimé à la presse hydraulique à la pression de 50 kilos par millimètre carré.	35,7	44,6	0,81	17,0
Acier pour coques de navires, essayé à l'état naturel.	29,6	52,5	0,56	18,0
Le même réduit par un laminage à froid de 10 millimètres à 9 ^{mm} ,45 d'épaisseur.	42,4	51,5	0,77	11,5
Tôle de fer à l'état naturel.	22,8	37,4	0,61	15,0
La même réduite par un laminage à froid de 8 millimètres à 7 ^{mm} ,10 d'épaisseur.	41,6	46,9	0,89	7,0

En poussant plus loin le laminage à froid on aurait certainement accentué l'effet produit.

Le moyen d'écrouissage le plus puissant paraît être l'étirage à la filière, qui est employé pour fabriquer le fil de fer ; il peut doubler la résistance du métal, mais en annulant presque complètement l'allongement permanent avant rupture.

Le battage au marteau produit des effets analogues à ceux de la compression ; il altère donc réellement le métal, mais dans une proportion bien moindre qu'on ne l'admet généralement, car il résulte de nos expériences qu'il ne réduit l'allongement que de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{3}$, à moins d'être poussé jusqu'à une limite que l'on n'atteint jamais dans la pratique des travaux.

Nous signalerons enfin le cisailage et le poinçonnage qui écrouissent le métal dans une zone très restreinte autour de la coupe de l'outil. Nous ferons une étude spéciale du poinçonnage dont on connaît l'importance au point de vue des grandes constructions.

80. *Trempe.* — Tout le monde connaît l'effet de la trempe sur les aciers à outils, dont elle augmente la dureté. Ce sujet ayant peu d'intérêt au point de vue de l'art de l'Ingénieur, nous nous bornerons à quelques notions sommaires.

La trempe à l'huile (*) augmente la résistance à la rupture et plus encore en général la limite d'élasticité, de sorte qu'elle augmente habituellement le rapport $\frac{L}{R}$, mais d'une manière peu sensible. Elle diminue la striction et plus encore l'allongement mesuré entre repères espacés de 200 millimètres.

(*) Voir le tableau final du : *Classement et emploi des aciers*, par Victor Deshages. — Dunod.

La trempe à l'eau augmente la limite d'élasticité à peu près de la même manière que la trempe à l'huile, lorsqu'elle est faite à la même température, mais en général elle augmente davantage la résistance à la rupture, et diminue bien plus en même temps la striction et l'allongement.

L'action de la trempe sur un métal est d'autant plus énergique qu'il contient plus de corps étrangers alliés au fer, et surtout de carbone. L'influence du silicium est cependant contestée. Pour les aciers et les fers doux, c'est-à-dire assez purs, la trempe a un effet très faible et insensible à la lime, mais qui n'est pas nul cependant. Il produit toujours une augmentation de résistance de 2 à 3 kilogrammes au moins.

L'effet de la trempe disparaît presque complètement par un recuit suffisant, de même que celui de l'écrouissage; comme lui il est caractérisé par une légère augmentation de la proportion de carbone dissout dans le métal et par conséquent aussi par une diminution du carbone existant à l'état de graphite non dissout.

81. *Effet de la température sur les métaux.* — Il y a peu de sujets sur lesquels les observateurs soient en désaccord aussi absolu (*), et cela s'explique par les difficultés que présentent les essais de résistance faits à de hautes températures. Laissant de côté ce qui est douteux, nous nous bornerons à ce qui est certain.

La résistance du fer et de l'acier n'éprouve pas de variations importantes jusqu'à 200° ou 300°. Vers 360° le fer de qualité ordinaire, renfermant une notable proportion d'impuretés devient extrêmement cassant. Son emploi serait donc pour certaines pièces exposées à s'échauffer, par exemple, pour les essieux de wagons, une cause de danger

(*) Voir le résumé des opinions contradictoires de divers auteurs dans l'ouvrage déjà cité de M. Weyrauch.

sérieux, que l'on évite en exigeant pour ces pièces un métal très pur.

Il semblerait résulter de certains essais que tous les aciers sont fragiles à 360° comme les fers impurs, mais ce fait n'est pas suffisamment établi.

Lorsque la température s'abaisse au-dessous de zéro, la résistance du fer et de l'acier ne varie guère, mais leur ductilité diminue et leur fragilité au choc augmente considérablement, surtout pour les métaux phosphoreux. Ce fait est l'une des causes de la fréquence des ruptures de rails et de bandages pendant les grands froids; l'autre cause de ces accidents est la dureté du sol gelé qui augmente la violence des chocs.

82. *Théorie de l'écroutissage.* — Les phénomènes de l'écroutissage doivent, pour être compris, être rapprochés de ceux de la striction. Nous avons vu en effet au paragraphe 10 que la résistance réelle du fer et de l'acier rapportée à la section de rupture est beaucoup plus élevée que la résistance rapportée à la section primitive, que l'on a l'habitude de considérer exclusivement, et qu'elle se rapproche beaucoup des résistances élevées que l'on obtient par l'écroutissage.

Pour prendre toute la puissance de résister dont elles sont capables, les molécules du métal ont besoin de se déplacer, de prendre une nouvelle orientation. Lorsqu'elles la prennent sous l'action d'une traction simple, c'est au prix d'une diminution de section qui en masque l'effet; mais il n'en est pas moins vrai que le métal prend ainsi une résistance considérable. Ainsi l'acier doux, auquel se rapporte la figure 4, résistait à 72 kilogrammes environ par millimètre carré au moment de la rupture, et sa résistance usuelle n'est que de 40^k,30. Pour les aciers extra-doux la différence est encore plus grande.

L'écroutissage produit le même effet que la traction à

un degré moindre ou plus énergique qu'elle, suivant l'intensité et la multiplicité des actions mécaniques dont il est le résultat; ainsi, dans l'étirage à la filière, où le métal est comprimé latéralement en même temps qu'il est tiré longitudinalement, on obtient une résistance un peu plus forte encore que dans la striction. Toutefois la différence n'est pas très grande, et, si elle semble énorme, c'est qu'en comparant les deux métaux, on a l'habitude de rapporter la résistance de l'un à la section primitive avant la diminution qu'a produite la striction, tandis qu'on rapporte la résistance de l'autre à la section que l'étirage a donnée au métal et qui ne diminue plus sensiblement au moment de la rupture.

L'étirage est en somme un moyen d'obtenir avant l'emploi dans toutes les parties d'un fil métallique les effets que la striction produirait en un seul de ses points et de les rendre plus énergiques encore par une compression latérale.

Si ces considérations sont exactes, l'infériorité de résistance à la traction des métaux recuits par rapport aux métaux écrouis vient pour la plus grande partie de la diminution de section que les premiers doivent subir dans la traction pour acquérir leur résistance maximum, tandis que les seconds l'ont acquise d'avance en recevant la forme sous laquelle ils sont employés. Par suite, cette infériorité devrait, sinon s'effacer complètement, du moins diminuer beaucoup dans la flexion, où, nous l'avons vu, le métal ne perd rien de sa section, lorsque ses molécules prennent l'orientation qui correspond à son maximum de résistance. Toutefois, ce n'est qu'après avoir pris une flèche, c'est-à-dire une déformation considérable, que les métaux recuits arrivent à leur résistance finale de flexion, tandis que les métaux écrouis se déforment très peu avant la rupture. Nous pensons en conséquence, mais sans l'avoir vérifié expérimentalement, que l'écrouissage doit augmenter beaucoup la limite d'élasticité de flexion et la raideur du métal, mais

ne produit pas un accroissement correspondant de la résistance à la rupture, comme cela a lieu dans la traction.

83. *Effets des chaudes locales.* — Les études qui précèdent permettent de trancher une question assez importante, au sujet de laquelle on a en général des idées que nous croyons inexactes.

Des auteurs éminents ont écrit que, lorsque l'acier est soumis à des allongements et à des raccourcissements successifs par suite de chaudes locales, qui mettent en jeu les dilatations, il en résulte une altération analogue à celle produite par la trempe qui rend le métal cassant. C'est par l'influence de cette espèce de trempe locale qu'on a expliqué en particulier les ruptures de tôles d'acier façonnées à chaud.

Nous avons établi au paragraphe 51 que l'altération qu'un métal subit par suite d'un allongement déterminé consiste surtout dans l'élévation de sa limite d'élasticité jusqu'à la tension qui correspond à cet allongement et dans la diminution de sa faculté d'allongement d'une quantité sensiblement égale à l'allongement subi. Or, une chaude locale circonscrite aussi brusquement qu'on peut le supposer, ne produit jamais que des allongements voisins de 1 p. 100, même lorsqu'on la pousse à 800° ou 1000° et, comme la transition des parties chaudes aux parties froides ne peut pas être absolument brusque, l'effet de cette chaude locale est au maximum d'allonger de $\frac{1}{2}$ p. 100 les parties voisines au moment de l'échauffement et de les raccourcir d'une égale quantité pendant le refroidissement. En se reportant aux figures 2, 3 et 4 on verra que ces déformations correspondent à des tensions supérieures de 2 kilogrammes au maximum à la limite d'élasticité du métal et que par suite les chaudes locales ne peuvent avoir d'autre effet que d'augmenter de 2 kilogrammes au plus la limite d'élasticité du métal et de diminuer de $\frac{1}{2}$ p. 100 son allongement de rupture. Ce sont

des modifications absolument négligeables, et inférieures aux différences que l'on trouve souvent entre deux échantillons prélevés dans une même tôle.

Nous avons voulu vérifier l'exactitude de ces déductions avec d'autant plus de soin qu'elles sont contraires aux idées généralement admises. Nous avons pour cela choisi un lingot d'acier dur, destiné à faire des rails, et nous l'avons fait laminé en une tôle de 35 millimètres d'épaisseur, qui a donné 70 kilogrammes de résistance. Nous avons soumis une partie de cette tôle à une chauffe locale poussée au rouge très vif, et aussi brusquement circonscrite que possible. Une fois la tôle refroidie, nous l'avons frappée à coups de masse, poinçonnée et cisailée en tous sens, sans y provoquer de ruptures. En outre des bandes découpées en dedans et en-dehors de la partie chauffée, ainsi qu'à la limite de la chauffe ont été soumises à un pliage méthodique, et ont donné un égal rayon de courbure et un égal allongement extérieur avant de se rompre.

Ces faits établissent que la chauffe locale n'avait produit aucune altération, ni dans la partie chauffée, ni dans son voisinage. L'expérience était d'autant plus concluante que nous avons réuni, à un degré dont on n'approche jamais en pratique, les trois conditions qui sont de nature à exagérer l'altération, c'est-à-dire l'épaisseur de la tôle, la dureté du métal et la netteté de la limite de la partie chauffée. Il fallait donc chercher ailleurs l'explication des ruptures qui se produisent souvent dans les tôles d'acier façonnées. Nous l'avons mise en évidence par une seconde expérience.

Un morceau de la même tôle a été soumis à une chauffe locale identique à la première; mais, au lieu d'être abandonnée à elle-même pendant le refroidissement, la tôle a subi dans la partie chauffée un martelage, qui a été continué jusqu'au moment où le rouge a disparu. Cette tôle a ensuite été abandonnée au refroidissement, puis apportée

à la cisaille comme la première. Dès le premier coup, au lieu de se couper d'une manière normale, elle s'est étoilée et brisée dans quatre directions. Les fentes ont pris naissance dans la partie martelée et se sont prolongées immédiatement jusqu'à 8 ou 10 millimètres au delà de ses limites.

Ces deux expériences prouvent bien que ce n'est pas aux chaudes locales qu'il faut attribuer les ruptures en question, mais aux déformations mécaniques dont on les accompagne, et que l'on continue souvent après que la température du métal est tombée au rouge sombre, point auquel l'écrouissage commence à devenir énergique.

Si des déformations intermoléculaires, aussi faibles que celles qui résultent des dilatations, altéraient le métal, il y aurait bien peu d'acier non altéré dans les constructions, car le dressage qu'il faut donner à chaque barre et à chaque tôle provoque des déformations plus grandes que la dilatation, surtout lorsqu'il s'agit de pièces cintrées comme les viroles de chaudières ou des tôles façonnées pour coques de navires, que l'on est obligé de transformer en surfaces non développables, ce qui exige un raccourcissement important dans certaines parties et un allongement non moins notable dans d'autres.

Nous ajouterons que, si les chaudes locales n'altèrent nullement la nature de l'acier (pourvu bien entendu qu'on ne brûle pas le métal), elles laissent subsister entre ses molécules des tensions et des pressions que le recuit seul peut faire disparaître. Mais ces forces intérieures sont absolument identiques à celles que laisse le dressage et il n'y a pas lieu de s'en préoccuper davantage. Il en est tout autrement des effets de l'écrouissage produit par le martelage au-dessous du rouge cerise, et il est indispensable de les faire disparaître par le recuit, si on veut se mettre à l'abri des ruptures. Nous arrivons donc à reconnaître la nécessité des précautions qui sont employées couramment dans les

arsenaux de la Marine, bien que nous n'admettions pas l'explication que l'on a donnée des accidents qu'elles doivent prévenir. Toutefois la distinction que nous avons faite n'est pas sans intérêt, car il y a des cas où on donne aux tôles façonnées des recuits locaux sans martelage et il importe de savoir qu'ils n'altèrent pas le métal.

Il est clair en outre que, si l'on sait que les ruptures proviennent du martelage continué après le refroidissement de la tôle et non de la chauffe locale, on pourra habituellement les éviter sans recourir au recuit, en cessant à temps le travail du métal.

CHAPITRE VI.

EFFETS DU POINÇONNAGE.

84. *Faits connus.* — On sait depuis longtemps que le perçage des trous au moyen du poinçon altère la qualité du métal, tandis que le forage à la mèche ne produit pas d'effets analogues. De nombreuses expériences ont été faites à ce sujet, mais la plupart du temps elles ont été poursuivies sans méthode, en faisant varier à la fois plusieurs éléments, de sorte qu'il est impossible d'en rien conclure de précis.

M. J. Barba a publié en 1875 (*) une étude sur l'emploi de l'acier, dans laquelle il a donné le résultat d'essais méthodiques faits à l'arsenal de Lorient, qui permettent de se rendre compte de l'effet du poinçonnage.

Des trous ont été percés dans des barrettes d'acier de 7 millimètres d'épaisseur, avec un poinçon de 17 millimètres de diamètre. Dans la première série, la matrice avait

(*) *Étude sur l'emploi de l'acier dans les constructions* par M. J. Barba, Ingénieur des constructions navales. — Baudry.

18 millimètres d'ouverture, et produisait des trous sensiblement cylindriques; dans la seconde la matrice avait 21 millimètres et donnait des trous coniques. Ces barrettes essayées à la traction ont donné les résistances suivantes :

Largeur des barrettes d'essai.	32 ^{mm.}	50 ^{mm.}	68 ^{mm.}	86 ^{mm.}	104 ^{mm.}	122 ^{mm.}
Résistance avec trous cylindriques.	42 ^{k,7}	40 ^{k,8}	39 ^{k,8}	35 ^{k,7}	33 ^{k,2}	36 ^{k,4}
Résistance avec trous coniques.	50,0	44,5	41,4	35,2	36,1	37,4

La résistance normale de la tôle, dans laquelle avaient été découpées ces barrettes, étant de 51 à 52 kilogrammes, ces chiffres prouvent que la diminution de résistance due au poinçonnage varie avec la largeur de la barrette d'essai et peut s'élever jusqu'à 31 p. 100. M. Barba s'est assuré que cette diminution de résistance n'est plus que de 3 p. 100 environ, lorsque la surface intérieure du trou poinçonné est enlevée au forêt ou à la lime sur une épaisseur de 1 millimètre, ou lorsque le trou est recuit après poinçonnage.

Enfin il a réussi à isoler au moyen de passes d'outil successives la bague de 1 millimètre d'épaisseur formée par le métal qui constitue la paroi intérieure d'un trou poinçonné, et il a reconnu que cette bague essayée à l'état naturel se brise sous la pression, sans pouvoir subir d'aplatissement sensible, tandis qu'essayée après recuit elle devient malléable et peut s'aplatir complètement sans se briser, comme les bagues analogues provenant de trous forés à la mèche.

Ce dernier essai prouve que la diminution de résistance des tôles poinçonnées provient d'une altération de la nature du métal et non de fissures produites par l'action du poinçon, car s'il en existait, le recuit serait impuissant à les faire disparaître. Ce résultat détruit ainsi une erreur très répandue.

On remarquera la différence des effets que produit le

poinçonnage, suivant que la barrette est plus ou moins large, ce qui en pratique correspond à un écartement plus ou moins grand des trous successifs, percés dans une tôle ou dans une barre de métal. M. Barba l'explique par le mode d'attache des barrettes d'essai, qui tend à faire passer la tension maximum dans les fibres altérées par le poinçonnage, lorsque la barrette est large, tandis qu'elle l'en éloigne, lorsque la barrette est étroite. Les expériences dont nous allons donner les résultats prouveront qu'on doit chercher ailleurs la cause de cette anomalie et qu'elle constitue un fait réel dont il faut tenir compte dans les calculs pratiques, et non une simple apparence provenant du mode d'expérimentation adopté.

85. *Nouveaux essais.* — Nos essais ont été faits sur des barrettes découpées en long dans deux tôles d'acier de 10 millimètres d'épaisseur présentant la composition suivante :

DÉSIGNATION de l'acier	TENEUR EN					RÉSISTANCE normale
	MANGANÈSE	CARBONE	SOUFRE	PHOSPHORE	SILICIUM	
Coulée 581 Martin.	0,31	0,22	0,05	0,069	0,12	51 ^k ,5
Coulée 137 Bessemer	0,38	0,33	0,04	0,073	0,14	60,0

Une première série d'essais a été faite sur des barrettes de forme analogue à celles qui avaient été essayées par M. Barba (fig. 19). La tôle avait 10 millimètres d'épaisseur.

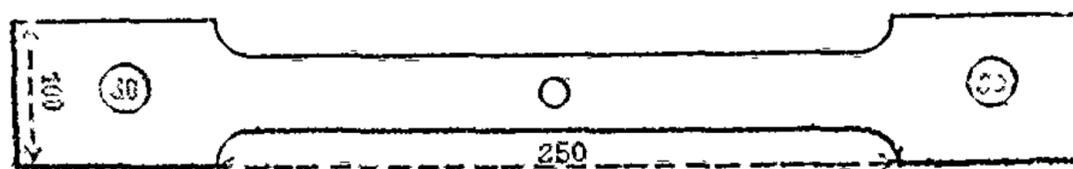


Fig. 19.

Le poinçon avait 17 millimètres et la matrice 18 millimètres de diamètre. Le trou de poinçon était percé au milieu d'une partie à bords parallèles ayant la largeur que l'on voulait essayer. Deux trous de 30 millimètres percés aux extrémités élargies servaient au passage de broches d'acier, au moyen desquels la barrette était soumise à une traction croissante, jusqu'à ce que la rupture se produisît. Les résultats obtenus sont les suivants :

DÉSIGNATION de l'acier essayé	RÉSISTANCE NORMALE de l'acier non percé	RÉSISTANCE DES BARRETTES poinçonnées ayant	
		32 millimètres de largeur	89 millimètres de largeur
		k.	k.
Coulée 581 Martin.	51,50	48,1	41,2
Coulée 137 Bessemer.	60,00	53,1	44,3

Ces premiers essais vérifiaient le fait déjà constaté par M. Barba, que la résistance des barrettes poinçonnées, par millimètre carré de section utile, est, dans certaines limites au moins, d'autant plus faible que la largeur est plus grande.

On devait se demander si la moindre altération des barrettes étroites ne venait pas de ce qu'elles pouvaient s'allonger et s'élargir librement sous l'effet du poinçon et s'écrouir ainsi à un degré moindre que les barrettes larges, en cédant plus facilement. Pour éclaircir ce point, nous avons répété le même essai sur des barrettes de 32 millimètres, mais en perçant le trou de poinçon avant de les réduire par le rabotage à leur largeur définitive. Nous avons trouvé dans ce cas :

47^k,1 de résistance pour la coulée 581 et
55,0 — — — — — 137

c'est-à-dire des chiffres sensiblement égaux à ceux obtenus dans le cas précédent. On doit donc écarter l'hypothèse que nous venons de formuler.

Pour fixer la valeur de celle que M. Barba avait admise, une seconde série d'essais a été faite sur des éprouvettes ayant la forme représentée dans la figure 20. Deux trous

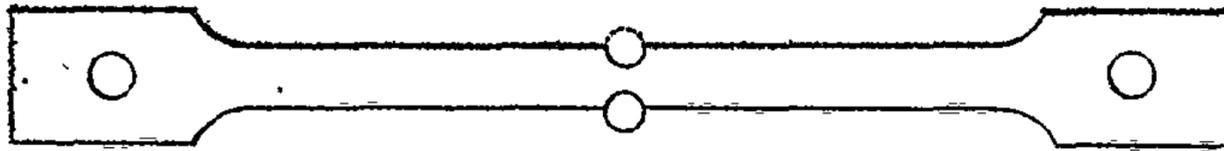


Fig. 20.

de poinçon étaient percés en face l'un de l'autre au milieu de la longueur de l'éprouvette et les faces étaient ensuite rabotées jusqu'à l'alignement des centres de ces trous.

Les lignes des tensions maxima qui d'après M. Barba sont tangentes aux trous percés dans les têtes devaient donc passer dans la zone altérée par le poinçon dans les barrettes de 30 millimètres de largeur et au-dessous, tandis qu'elles devaient passer dans le métal non altéré, lorsque la largeur entre les bords des trous de poinçon était supérieure à 30 millimètres. Si donc la variété des résultats donnés par les essais de la première série avait pour cause l'influence du mode d'attache des éprouvettes, elle devait se retrouver dans la seconde série, mais en sens inverse ; c'est-à-dire que la résistance devait être d'autant plus grande que la largeur entre les trous de poinçon était elle-même plus considérable. Or les résultats ont été précisément contraires, ainsi que le prouve le tableau suivant :

DÉSIGNATION de l'acier essayé	RÉSISTANCE normale de l'acier non percé	RÉSISTANCE PAR MILLIMÈTRE CARRÉ DES BARRETTES lorsque l'écartement des trous est de					
		5 millim.	6 millim.	8 millim.	14 millim.	30 millim.	60 millim.
Coulée 581. Coulée 137.	k. 51,50 60,00	k. 67,1	k. 65,4	k. 64,0 73,7	k. 52,4 62,3	k. 45,1 52,9	k. 42,9 48,2

Les chiffres de ce tableau sont de nature à surprendre, car, s'ils révèlent pour les éprouvettes de 30 et de 50 millimètres une diminution de résistance d'autant plus grande que la distance des trous est plus forte, ils montrent qu'il y a au contraire augmentation de résistance pour les distances inférieures à 14 millimètres, et cela à un degré d'autant plus accentué que les trous sont plus rapprochés.

On pouvait se demander si ces résultats n'étaient pas la conséquence de ce fait bien connu que, lorsqu'une barrette présente une section étranglée très courte, elle peut supporter une tension supérieure à la résistance normale du métal essayé en longue éprouvette prismatique. Pour nous fixer sur ce point, nous avons répété le même essai sur une barrette identique, mais dont les trous étaient percés à la mèche et écartés de 5 millimètres. La barrette qui appartenait à la coulée 581 a donné une résistance de $59^k,50$, supérieure de $8^k,00$ à la résistance normale de cet acier.

Il y a donc lieu de diminuer de $8^k,00$ environ les résistances constatées pour les barrettes de 5 millimètres entre trous, afin de tenir compte de l'influence de leur forme, et il reste démontré que l'influence proprement dite du poinçonnage leur a donné une augmentation de résistance de 15 p. 100 environ.

86. *Explication des effets du poinçonnage.* — On se trouve donc en présence de ce fait que le poinçonnage augmente la résistance du métal quand les trous sont très rapprochés, qu'il ne la modifie pas quand l'écartement des bords extérieurs des trous est porté à 14 millimètres et qu'il la diminue ensuite d'autant plus que l'écartement des trous dépasse davantage cette valeur; ces chiffres n'étant absolument exacts que dans les conditions où les essais ont été faits, c'est-à-dire pour des tôles de 10 millimètres percées de trous cylindriques de 17 millimètres.

Pour expliquer cette anomalie apparente, il faut se rap-

peler le fait constaté par M. Barba et facile à vérifier par d'autres moyens, que le métal altéré au contact du poinçon ne peut subir aucune déformation notable sans se briser. D'où il faut conclure qu'au contact du poinçon le métal reçoit un écrouissage intense, qui augmente sa résistance et diminue considérablement son allongement avant rupture. Et en effet, lorsqu'on examine la cassure d'une barrette d'acier doux poinçonné, on remarque que, tandis que les parties A, A' ont l'aspect soyeux du métal naturel, le trou est entouré de deux parties B, B' ayant de 3 à 4 millimètres de largeur qui présentent la cassure à grain du métal écroui (fig. 21).



Fig. 21.

Si l'on se rappelle d'ailleurs le fait bien connu, qu'en enlevant 1 millimètre de diamètre autour d'un trou poinçonné, on restitue à la tôle une résistance sensiblement normale, on arrive à expliquer tous les phénomènes observés de la manière suivante :

La courbe de déformation du métal naturel étant représentée par OLR, la courbe de déformation du métal altéré au contact du poinçon est représentée par une ligne telle que OL''R'' qui est celle du métal fortement écroui et qui correspond à une résistance élevée et à un allongement extrêmement faible (fig. 22).

Le métal intermédiaire, par exemple celui qui est à un millimètre du trou, a une courbe de déformation intermédiaire telle que OL'R'.

Lorsqu'on soumet à un effort de traction la barrette formée de ces métaux accolés, le métal le plus écroui se brise dès que l'allongement de la barrette est égal à OC, et

sa rupture entraîne celle de toute la section. Il est évident qu'à ce moment la tension du métal naturel est égale à CM , celle du métal intermédiaire égale à CM' , et celle du métal

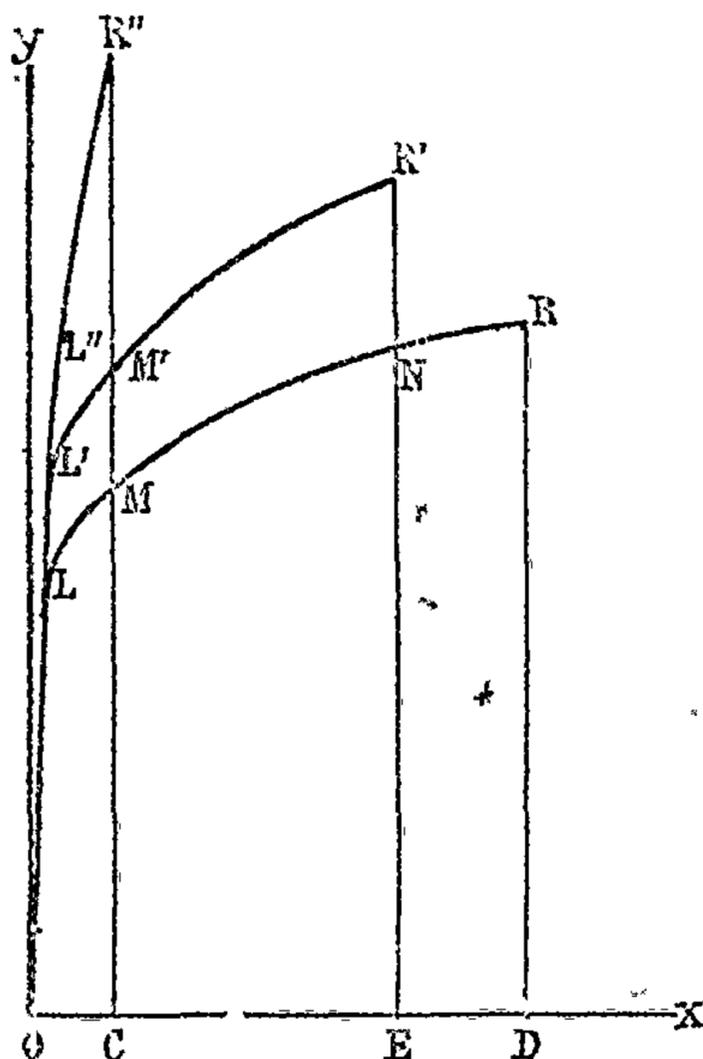


Fig. 22.

écroui à CR'' , ces valeurs correspondant pour les divers métaux accolés à un même allongement OC .

Si la barrette est très large, la tension moyenne de la section n'est que fort peu influencée par la valeur de la tension dans la partie écrouie, qui a peu de largeur, et elle est par suite très voisine de CM , tension du métal naturel, et très inférieure à sa résistance normale DR .

Si au contraire la barrette est très étroite, ou les trous très rapprochés, ce qui revient au même, il ne reste pas entre les trous de métal non altéré, et la tension moyenne est intermédiaire entre CM' et CR'' et par suite supérieure à la résistance normale DR .

Il est également facile d'expliquer ce qui a lieu lorsqu'on enlève 1 millimètre de métal autour du trou.

La courbe OL''R'' disparaît avec le métal enlevé, et la rupture se produit lorsque la barrette a pris un allongement OE, égal à l'allongement de rupture du métal situé à 1 millimètre du trou. La tension moyenne de la section est alors intermédiaire entre EN et ER' et se rapproche beaucoup de la résistance normale DR.

Les expériences que nous venons de faire connaître nous semblent suffisantes pour expliquer les phénomènes qui se produisent lorsqu'on brise une section poinçonnée, mais elle n'apprennent rien sur ce qui a lieu quand la tension reste inférieure à la charge de rupture. Elles ne font pas savoir notamment, si le métal altéré par le poinçonnage est mis, par l'action même du poinçon, dans un état permanent de tension ou de compression. Pour élucider ce point, nous avons fait l'expérience suivante.

87. *Tension permanente du métal poinçonné.* — Une bande de tôle d'acier à coque de 800 millimètres de longueur et de 140 millimètres de largeur a été découpée et recuite, de manière à faire disparaître toute tension préexistante, s'il y en avait (fig. 23).

Un trou a été percé en A au poinçon. Puis on a percé au foret deux trous B et C et la tôle a été coupée à la raboteuse sur toute son épaisseur suivant la rainure BC. Une entaille a été faite en E à la lime et approfondie de manière à réduire à 20 millimètres la largeur de métal restant entre elle et le trou A. Enfin on a coupé successivement à la lime la matière restant entre la rainure et le trou A d'une part, entre la rainure et l'extrémité opposée de la tôle d'autre part.

A ce moment les deux languettes EF et GH n'étaient plus réunies que par le métal laissé entre l'entaille E et le trou de poinçon A ; les tensions intérieures, s'il en existait

autour de ce trou, pouvaient donc se manifester librement en faisant tourner la baguette EF autour de la section EA.

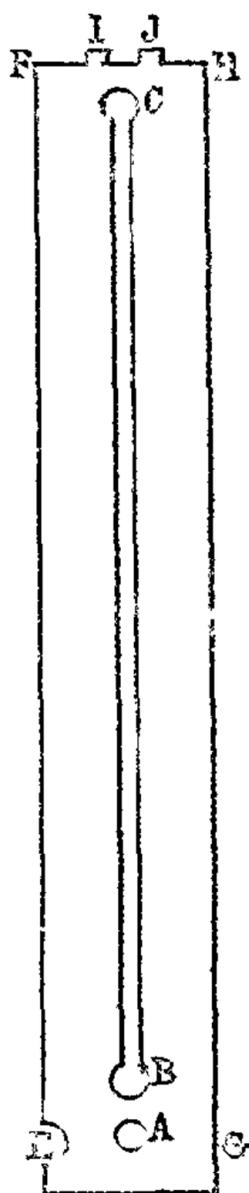


Fig. 23.

En effet des repères en saillie ménagés en I et J permettent de constater par l'emploi très précis du Palmer que les deux languettes s'étaient rapprochées de $2^{\text{mm}},4$ et de conclure par suite que le poinçonnage avait mis les molécules voisines du trou dans un état de tension très marqué, qui avait produit le rapprochement observé, dès qu'on avait supprimé les liaisons qui s'y opposaient.

Il était d'ailleurs probable que l'épaisseur de 20 millimètres restant entre E et A était trop forte pour permettre à ce mouvement de prendre toute son amplitude, parce qu'elle laissait encore subsister une largeur de métal non

altéré hors de proportion avec la largeur de la zone en tension. En effet, lorsqu'on eût continué à approfondir à la lime l'entaille E, le rapprochement des languettes augmenta et atteignit sa valeur maximum $3^{\text{mm}},6$, au moment où la largeur restant entre l'entaille et le trou de poinçon fut réduite à 8 millimètres.

Nous avons cherché à calculer la valeur de la tension que produit le poinçonnage autour du trou, en nous basant sur ces résultats, et nous sommes arrivé au chiffre de 30 kilogrammes par millimètre carré; mais ce calcul est si délicat que nous en regardons le résultat comme fort incertain.

Nous nous bornerons donc à conclure de ce qui précède, que le métal qui forme les parois des trous de poinçon se trouve dans un état de tension continuuel d'une grande intensité, lorsque les fibres suffisamment éloignées des trous sont à l'état d'équilibre.

Soit n la valeur de cette tension préexistante à tout effort extérieur, il est clair que, lorsque les forces auxquelles la construction doit résister viendront agir et imposeront au métal un effort de traction moyen de 8 kilogrammes par exemple, la tension des fibres altérées par le poinçonnage sera sensiblement égale à $8^k + n$, puisque les augmentations de tension sont proportionnelles aux allongements jusqu'à la limite d'élasticité. Par suite, dans un pont calculé pour un effort maximum de 8 kilogrammes par exemple et nouvellement construit, il est probable que la tension des fibres altérées par le poinçonnage atteint 15, 20, 25 et peut-être 30 à 35 kilogrammes par millimètre carré.

Il est possible qu'il y ait dans ce fait, au point de vue de la durée des constructions, un danger distinct de celui qui résulte de la diminution de résistance moyenne causée par le poinçonnage et qui peut en aggraver les conséquences. Il peut se faire aussi que cette tension intermoléculaire du métal autour du trou de poinçon disparaisse à

la longue par suite d'un allongement relatif des fibres altérées résultant précisément de leur excès de tension. Il y a là une question délicate sur laquelle nous ne voulons pas hasarder même une hypothèse, et qui ne peut être tranchée que par de nouveaux essais exécutés sur des barres poinçonnées depuis de longues années.

88. *Aigreur du métal poinçonné.* — Le métal poinçonné est exposé à un autre danger, par suite de son manque presque absolu de ductilité. Si l'on prend en effet une barrette de tôle d'acier, qualité coque, percée au centre d'un trou poinçonné, et, si on la plie au point où ce trou est percé, on constate qu'elle se brise dès que la flexion atteint un angle de 15 à 25°, tandis qu'une barrette du même acier percée au foret ou recuite après poinçonnage peut supporter sans se rompre une flexion de 90° à 130°.

De même, si l'on examine une barre poinçonnée et brisée par traction, on constate que le trou s'est allongé de 1^{mm},5 au plus, tandis que les trous forés ou recuits s'allongent de 4, 5, 6 millimètres et parfois de 7^{mm},5 avant de se briser. Nous verrons plus tard combien est grande l'importance de cette différence au point de vue de la résistance des constructions rivées aux chocs ou aux déformations forcées; mais il est facile de se rendre compte immédiatement du danger qui résulte de l'aigreur du métal poinçonné, si on a à lui faire subir le moindre travail à froid. Une tôle poinçonnée de médiocre qualité peut en effet se fendre légèrement dans les trous par le seul fait d'un cintrage ordinaire et ne présenter ensuite aucune garantie de solidité.

89. *Influence de la composition du métal.* — Il est donc utile de faire disparaître l'altération due au poinçonnage, quel que soit le métal employé; mais cela est plus ou moins nécessaire suivant sa nature. La perte de résis-

tance due au poinçonnage varie en effet beaucoup, suivant que le métal est du fer ou de l'acier plus ou moins dur. Le tableau suivant indique les résultats que nous avons obtenus sur des barrettes de 70 millimètres de largeur et de 10 millimètres d'épaisseur de divers métaux.

DÉSIGNATION du métal	TENEUR EN		RÉSISTANCE normale à la rupture	RÉSISTANCE après poinçonnage	PERTE DE RÉSISTANCE	
	Carbone	Manganèse			en kilog.	pour 100
Fer supérieur. . . .	no analysé		kil. 37,4	kil. 30,0	kil. 7,4	19 0/0
Fer phosphoreux. . .	Idem.		41,0	31,4	8,6	21
Bessemer très doux	0,18 0/0	0,27 0/0	47,0	37,6	9,4	20
Martin doux.	0,22	0,34	52,5	41,2	11,3	22
Bessemer mi-dur. . .	0,33	0,38	60,0	44,8	15,2	25
Bessemer dur.	0,66	0,50	81,7	53,4	28,3	34

La perte de résistance due au poinçonnage augmente donc avec la résistance elle-même et ses conséquences sont d'autant plus graves que le métal employé est plus dur.

90. *Influence de l'état physique du métal.* — L'infériorité de résistance des sections poinçonnées résultant de la différence de ductilité du métal altéré par le poinçon et du métal non altéré, il est facile de prévoir que, de deux métaux de même nature primitive, le moins sensible à l'effet du poinçonnage sera celui qui sera d'avance le plus écroui. Si même on pouvait donner à toutes les parties d'une tôle un degré d'écrouissage aussi intense que celui qui résulte du poinçonnage, elle ne perdrait rien de sa résistance par le poinçonnage. Les essais suivants confirment l'exactitude de ces prévisions.

DÉSIGNATION du métal	VALEUR de $\frac{L}{R}$	RÉSISTANCE normale à la rupture	RÉSISTANCE après poinçonnage.	PERTE DE RÉSISTANCE	
				kilog.	pour 100
Fer naturel.	0,61	37,4	30,0	7,4	19 0/0
Le même écroui.	0,89	46,9	42,7	4,2	9
Acier recuit.	0,54	49,0	36,9	12,1	24
Le même non recuit.	0,56	52,5	41,2	11,3	22
Le même trempé.	0,77	63,0	55,1	8,1	14
Le même écroui.	0,77	54,5	49,2	5,3	10

La diminution de résistance due au poinçonnage est donc d'autant moindre que le degré d'écrouissage préalable du métal est plus élevé, comme on devait le prévoir.

Le recuit, étant l'inverse de l'écrouissage, exerce naturellement une influence fâcheuse sur la résistance définitive, lorsqu'il a lieu avant le poinçonnage, parce qu'il a pour effet d'exagérer la différence entre le métal écroui par le poinçonnage et celui qui ne l'est pas. Il est au contraire un remède absolu quand il a lieu après le poinçonnage, parce qu'il fait disparaître à la fois l'écrouissage et les tensions intermoléculaires des parties altérées et rend au métal une homogénéité complète.

91. *Influence de l'épaisseur.* — Nous avons fait un très grand nombre d'essais sur les tôles d'épaisseur variant entre 8 et 15 millimètres, qui intéressent spécialement le constructeur, et dans ces limites nous avons trouvé que l'épaisseur influe peu sur les effets du poinçonnage. Nous avons au contraire essayé un très petit nombre de tôles minces, et c'est sous toutes réserves que nous donnons les chiffres suivants qui indiquent la variation de l'altération due au poinçonnage suivant l'épaisseur de la tôle.

DÉSIGNATION du métal	PERTE DE RÉSISTANCE POUR DES ÉPAISSEURS DE				
	8 ^{mm}	6 ^{mm}	4 ^{mm}	2 ^{mm}	1 ^{mm}
Acier Martin doux.	p. 100 22	p. 100 19	p. 100 16	p. 100 14	p. 100 12

92. *Essais des tôles poinçonnées et rivées.* — Tous les essais de barres poinçonnées et rivées dont nous avons parlé jusqu'à présent ont été faits en produisant la rupture par des efforts de traction exercés sur les têtes des barrettes d'essai, tandis que dans la pratique les forces qui agissent sur les barres assemblées sont produites par la résistance des rivets eux-mêmes. Il était donc nécessaire de briser des barrettes rivées, et de reconnaître si les lois constatées précédemment s'appliquent dans ce cas.

Nous avons fait une première série d'essais sur des tôles assemblées à double couvre-joint, représentées par la

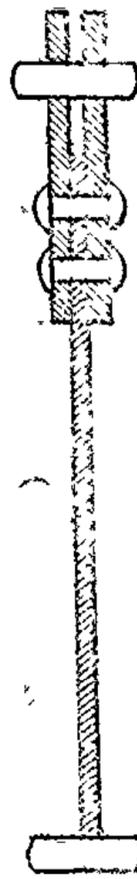


Fig. 24.

figure 24. Les bandes de métal avaient 69 millimètres de largeur et 10 millimètres d'épaisseur. On avait donné aux rivets un diamètre de 23 millimètres, suffisant pour assurer leur résistance, de telle sorte que la rupture se produisait toujours dans la tôle et non dans les rivets eux-mêmes.

Les essais ont donné les résistances suivantes par millimètre carré de section utile :

Résistance de la tôle non percée. 52^k,0

Résistance des barres simplement poinçonnées

38,5 — 39,2 moyenne. 38^k,8

Résistance d'une barre forée. 51^k,0

L'infériorité de résistance des tôles simplement poinçonnées par rapport aux tôles identiques, mais forées, a donc

été de $\frac{51,0 - 38,8}{51} = 24$ p. 100.

En se reportant aux tableaux que nous avons donnés plus haut, on verra que ce chiffre est très voisin de la perte de résistance que produit le poinçonnage sur des barres d'un acier analogue, non rivées, mais percées en leur milieu d'un simple trou, et on doit admettre par conséquent que l'assemblage à double couvre-joint n'exerce aucune action défavorable sur la résistance du métal.

La cassure du métal était identique à celle des barrettes non rivées et passait naturellement par le trou le plus rapproché du corps de la barre.

L'identité des résultats obtenus avec les barres assemblées à double couvre-joint et avec les tôles percées d'un simple trou s'explique naturellement, parce que ce mode d'assemblage n'impose au métal aucune flexion qui le prédispose à la rupture.

Une seconde série d'essais a été faite sur des tôles assemblées à recouvrement, représentées par la figure 25. Les dimensions des barres et des rivets étaient les mêmes que dans les essais précédents.

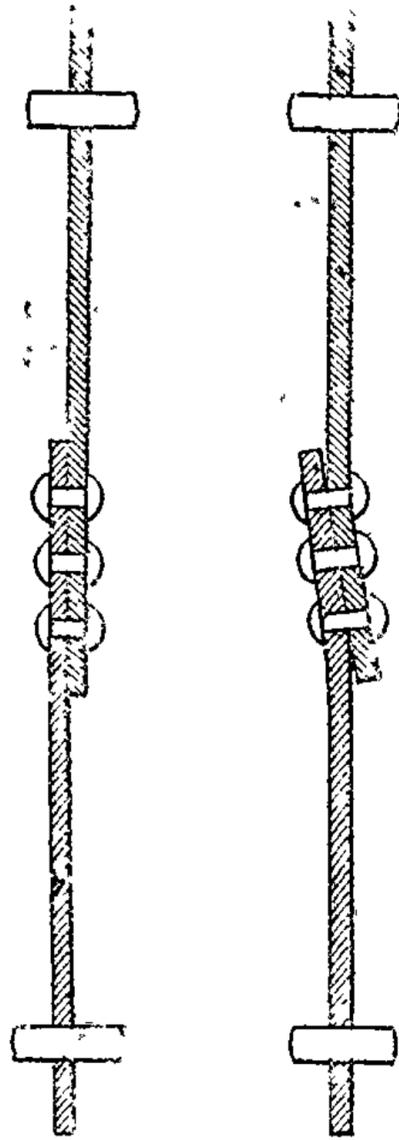


Fig. 25.

Fig. 26

Les essais ont donné les résistances suivantes par millimètre carré de section utile.

Résistance de la tôle non percée.	52 ^k ,0
Résistance des barres simplement poinçonnées	
33 ^k ,7 — 33 ^k ,7 moyenne.	33 ^k ,7
Résistance d'une barre recuite après poinçonnage	54 ^k ,5
Résistances des barres forées 53 ^k ,1 — 54 ^k ,5	
moyenne.	53 ^k ,8

L'infériorité de résistance des tôles simplement poinçonnées par rapport aux tôles identiques mais forées ou recuites après le poinçonnage a donc été de $\frac{53,8 - 33,7}{53,8} =$

37 p. 100.

Le danger résultant du poinçonnage s'aggrave donc singulièrement, lorsque les tôles sont assemblées à recouvrement ou à simple couvre-joint, ce qui produit le même

effet. Ce fait, qui peut paraître bizarre au premier aspect, est en réalité bien naturel. En effet, lorsque la traction agit sur l'assemblage, celui-ci tend à prendre la forme représentée par la figure 26; les deux tôles se rapprochent de la direction de la force qui les sollicite, et il en résulte une flexion qui est surtout prononcée dans les sections percées. Or nous avons vu avec quelle facilité les tôles poinçonnées se brisent par le pliage, et il est bien naturel que la flexion qui leur est imposée précipite leur rupture, tandis qu'il n'en est pas de même pour les tôles forées ou recuites, qui supportent parfaitement les pliages.

93. *Augmentation de résistance résultant de l'alésage ou du recuit.* — Jusqu'à présent nous avons comparé la résistance du métal poinçonné à celle du métal naturel, et nous avons fait ressortir la perte produite par le poinçonnage. On peut poser autrement le problème et se demander de combien on augmente la résistance d'un métal, poinçonné en alésant ou en recuisant les trous. On arrive aux résultats suivants au moyen des chiffres précédemment obtenus.

Augmentation de résistance produite par l'alésage des trous ou le recuit pour :

	p. 10
Le fer simplement poinçonné	$\frac{20}{100 - 20} = 25$
L'acier extra-doux —	$\frac{20}{100 - 20} = 25$
L'acier à 50 kilog. de résist. simplement poinçonné	$\frac{22}{100 - 22} = 28$
L'acier à 60 kilog. de — —	$\frac{25}{100 - 25} = 33$
L'acier à 50 kilog. assemblé à double couvre-joint	$\frac{24}{100 - 24} = 31$
L'acier à 50 kilog. assemblé à recouvrement ou à simple couvre-joint .	$\frac{37}{100 - 37} = 59$

Nous ne donnons pas ces chiffres comme absolus, mais simplement comme voisins de la vérité, car on sait que les métaux de même résistance ne présentent pas une identité complète à tous les points de vue. Du reste une légère variation ne modifierait pas leur importance, que nous n'avons pas besoin de faire ressortir.

94. *Essais au choc.* — Les barrettes essayées étaient semblables à celles à double couvre-joint représentées par la figure 24, sauf la longueur qui était portée à 1 mètre. La tête supérieure était solidement fixée à un support invariable, et un goujon de 40 millimètres de diamètre traversant l'œil de la tête inférieure transmettait à la barrette les chocs résultant de la chute d'un mouton de 300 kilogrammes.

Les barrettes avaient 69 millimètres de largeur et 10 millimètres d'épaisseur.

On a obtenu les résultats suivants :

RÉSISTANCE NORMALE à la rupture du métal par traction lente	DIAMÈTRE des trous de rivets	HAUTEUR CUMULÉE DES CHOCS supportés avant la rupture, les trous étant		
		poinçonnés	poinçonnés et recuits	forés.
kl.	mm.	m.	m.	m.
52,00	23	0,25	5,00	2,75
51,50	18	—	—	2,90
60,70	18	1,10	—	2,90

Ces chiffres établissent que le poinçonnage diminue la résistance au choc des barres rivées dans une proportion bien plus considérable encore que leur résistance statique.

95. *Suppression de l'altération due au poinçonnage.* — Comme nous l'avons déjà dit au paragraphe 84, M. Barba a prouvé que, pour rendre aux tôles poinçonnées de 7 à 10 millimètres d'épaisseur une résistance sensible-

ment égale à celle des tôles forées, il suffit d'aléser les trous de 1 millimètre en rayon, soit de 2 millimètres en diamètre.

Nous avons reçu communication d'essais exécutés récemment à l'arsenal de Brest sur 24 barreaux prélevés dans une tôle de coque de 14 millimètres d'épaisseur, qui prouvent qu'il ne suffit pas d'agrandir les trous de poinçon de 2 millimètres pour rendre au métal sa résistance primitive, lorsqu'on dépasse les épaisseurs expérimentées par M. Barba.

La partie prismatique de chaque barreau d'essai avait 40 millimètres de largeur et 160 millimètres de longueur. Elle était percée en son milieu d'un trou de 21 millimètres de diamètre définitif.

On a essayé quatre séries de six barreaux.

Dans la première série les trous ont été simplement poinçonnés à 21 millimètres.

Dans la deuxième ils ont été poinçonnés à 19 millimètres et alésés à 21 millimètres.

Dans la troisième ils ont été poinçonnés à 21 millimètres et les barreaux ont ensuite été soumis à un recuit local.

Dans la quatrième série les trous ont été forés à 21 millimètres de diamètre, sans poinçonnage préalable.

On a mesuré, non seulement la résistance de rupture par millimètre carré de section utile, mais encore l'allongement total permanent, pris par la partie prismatique de chaque barreau. Cet allongement résultait exclusivement de la striction qui se produisait près du trou au moment de la rupture, car les parties entières du barreau ne supportaient que des tensions inférieures à la limite d'élasticité au moment où la section poinçonnée se brisait, et elles ne pouvaient par suite prendre aucun allongement permanent appréciable.

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau ci-après :

NATURE DES TROUS	RÉSISTANCE par millimètre carré de section utile	ALLONGEMENT TOTAL
Trous poinçonnés à 21 millimètres.	kil.	mm.
	47,196	1,0
	42,523	1,5
	48,130	1,5
	49,065	1,5
	43,831	2,0
	45,598	2,0
Moyenne.	46,057	1,583
Trous poinçonnés à 19 millimètres et agrandis au foret à 21 millimètres.	55,981	5,0
	51,401	3,0
	53,738	5,5
	51,401	2,5
	54,579	5,0
	54,766	2,5
	Moyenne.	53,644
Trous poinçonnés à 21 millimètres et re- cuits.	48,598	6,0
	55,887	7,5
	54,392	6,0
	53,644	7,5
	56,074	7,5
	48,411	4,0
	Moyenne.	53,834
Trous forés à 21 milli- mètres.	53,738	7,5
	65,420	6,5
	66,355	6,0
	57,943	5,5
	65,420	6,5
	57,009	4,5
	Moyenne.	60,746

Ces essais motivent les observations suivantes :

L'acier essayé avait une résistance supérieure à celle des tôles ordinairement employées dans la Marine et une irrégularité que nous n'avons jamais rencontrée dans nos essais. Ainsi on a constaté la différence exceptionnelle de 12^k,500 dans la résistance de barreaux forés, découpés côte à côte. Bien que cette irrégularité diminue la valeur des résultats obtenus, on peut néanmoins attacher une sérieuse importance aux moyennes qui en résultent.

La largeur de 40 millimètres, adoptée pour les barreaux, est trop faible pour donner à l'altération du poinçonnage son maximum d'intensité, et il est certain que, si elle avait été portée à 70 ou 75 millimètres, on aurait trouvé des pertes de résistance notablement plus élevées ; cela résulte des expériences citées au paragraphe 84.

Les tôles simplement poinçonnées ont donné une résistance inférieure de 24,2 p. 100 à celle des tôles forées, et les tôles alésées ou recuites après poinçonnage ont eu une résistance inférieure de 11,5 p. 100 à celle des tôles forées.

Les résultats produits par l'alésage des trous poinçonnés ont donc été bien moins avantageux que ceux que M. Barba a indiqués, puisqu'il a obtenu par ce procédé la même résistance que par le forage simple à 3 p. 100 près. Ce désaccord ne semble pouvoir venir que de la différence d'épaisseur des tôles essayées, et il est bien naturel en effet que l'altération produite par le poinçonnage s'étende d'autant plus loin que la tôle est plus épaisse. Cette supposition est confirmée par ce fait que l'allongement a été bien moindre pour les trous alésés que pour les trous forés ; cela prouve qu'il restait après l'alésage un anneau du métal écroui, dont la rupture prématurée a provoqué celle de la section entière.

Il est donc probable que, s'il suffit d'aléser de 2 millimètres les trous poinçonnés dans les tôles de 10 millimètres, il faut les agrandir de 3 millimètres environ dans les tôles de 15 millimètres, et peut-être de 4 millimètres dans les tôles de 20 millimètres d'épaisseur. C'est un point à vérifier.

Les résultats donnés à Brest par le recuit sont également en désaccord avec ceux que M. Barba a obtenus et que nos expériences ont pleinement confirmés. L'infériorité des résistances constatées vient assurément de ce que le recuit obtenu par un procédé que l'on expérimentait n'a pas été suffisant, et ce qui le prouve, c'est que les deux barreaux recuits qui ont donné la moindre résistance sont aussi ceux qui ont eu le moindre allongement. Si le recuit avait

été plus intense, c'est l'inverse qu'on aurait obtenu et on aurait eu pour tous les barreaux recuits des allongements plus forts que pour les barreaux forés, comme nous l'avons constamment remarqué.

On doit noter la grande différence des allongements avant rupture qui se sont produits dans les tôles forées et dans les tôles poinçonnées. Le rapport en est égal à 4,00. C'est évidemment à ce fait qu'il faut attribuer en grande partie l'infériorité des tôles poinçonnées au point de vue de la résistance au choc que nous avons signalée au paragraphe 94.

96. *Dépense d'alésage.* — La dépense occasionnée par l'alésage pour une tôle de 14 millimètres d'épaisseur, de 4^m,50 de longueur et de 1^m,00 de largeur comportant 300 trous à été de 0^f,0034 par trou, soit de 1^f,04 pour la tôle entière, ou de 0^f,20 par 100 kilogrammes. En tenant compte de l'augmentation de dépense qu'aurait entraînée l'enlèvement de 3 millimètres en diamètre au lieu de 2 millimètres, ainsi que de l'amortissement du matériel et des manœuvres de tôle supplémentaires nécessitées par l'alésage, on arrivera en tous cas à une dépense totale de 0^f,50 à 0^f,60 par 100 kilogrammes au maximum pour l'alésage des trous poinçonnés.

Le forage direct des trous est beaucoup plus coûteux. M. Barba a noté qu'il avait fallu 65^h,30' de machine à percer pour forer 915 trous et on ne peut pas évaluer à moins de 0^f,70 le prix de revient de l'heure de machine, tout compris, ce qui donnerait une dépense de 0^f,05 par trou, soit environ 15 fois plus que le coût de l'alésage.

Nous croyons qu'on pourrait réduire de beaucoup cette dépense, et il faut en tout cas tenir compte de celle du poinçonnage, qui est supprimée avec le forage, tandis qu'elle subsiste avec l'alésage. Néanmoins il est reconnu que le forage coûte plus cher que le poinçonnage suivi de l'alésage,

et surtout qu'il exige un outillage beaucoup plus considérable, par suite de la faible production de chaque machine à forer.

Quant au recuit local, il n'est pas plus coûteux que l'alésage, mais il demande une grande surveillance et produit dans certains cas des déformations qui exigent un second dressage et compromettent la coïncidence des trous de rivets.

Nous croyons en conséquence que c'est par l'alésage qu'il convient en pratique de faire disparaître l'altération résultant du poinçonnage, et que la dépense supplémentaire qu'il exige ne dépasse pas 0^f,60 à 1^f,00 par 100 kilogrammes pour les grandes constructions, qui ne comportent pas plus de trous par unité de poids que la tôle de coque alésée à Brest. La justification la plus péremptoire que nous puissions donner de notre opinion est l'usage établi depuis une dizaine d'années dans les arsenaux de la marine, où les trous de rivet à percer dans les tôles d'acier sont poinçonnés, puis alésés au foret. Cette longue expérience a prouvé définitivement que l'alésage est facile et ne présente aucun inconvénient.

97. *Utilité de l'alésage ou du forage.* — Après l'étude que nous venons de faire, il peut sembler évident qu'il convient de faire disparaître l'altération due au poinçonnage, et que ce n'est pas trop de payer 0^f,60 à 1^f,00 par 100 kilogrammes une augmentation de résistance statique à la rupture de 25 à 59 p. 100, un accroissement de résistance au choc du simple au triple environ, et un pouvoir quadruple de subir sans rupture des déformations par flexion ou par traction.

Nous croyons cependant que la question n'est pas épuisée et nous allons indiquer une restriction qu'il faut faire aux conséquences apparentes de ce qui précède.

Nous avons vu quelle est la cause de la diminution de

résistance à la rupture causée par le poinçonnage. Au contact du poinçon le métal est écroui, à peu près comme le fil de fer l'est par l'étirage à la filière ; il éprouve, par suite de cet écrouissage, une augmentation de limite d'élasticité et une diminution d'allongement de rupture, et il se brise pour une faible déformation, alors que les fibres de métal non altéré qui travaillent avec lui sont encore bien loin d'avoir donné toute leur résistance.

Il y a donc entre les deux métaux accolés un désaccord que l'on peut comparer à celui de deux chevaux qui ne tirent pas ensemble. L'un arrive à la limite de sa force sans pouvoir démarrer, parce que l'autre ne tire pas assez, au moment où il donne son maximum d'effort.

C'est ainsi qu'on arrive à s'expliquer ce fait bizarre qu'une section poinçonnée se brise sous un effort moyen par millimètre carré inférieur à la résistance de chacun des métaux qui la composent.

Mais, s'il en est ainsi, l'infériorité du métal poinçonné ne naît qu'au moment où les deux métaux accolés cessent de travailler également, c'est-à-dire lorsque la tension atteint la limite d'élasticité du métal naturel. Jusque-là cette infériorité n'existe pas, et par suite nous ne voyons aucune raison de penser que les causes, qui diminuent la résistance à la rupture du métal poinçonné influent sur sa fatigue et sur sa durée, tant que les efforts auxquels il est soumis restent inférieurs à la limite d'élasticité, comme c'est le cas de toutes les constructions métalliques.

Il nous semble que la seule objection qu'on peut faire à ce raisonnement serait tirée de l'expérience que nous avons décrite au paragraphe 87. Elle prouve en effet que le poinçonnage produit des tensions intermoléculaires, qui augmentent la fatigue du métal, et qui semblent de nature à diminuer sa durée. Mais nous répéterons qu'il est possible que ces tensions disparaissent à la longue par les allongements même qu'elles produisent, si elles fatiguent réelle-

ment le métal, et qu'il peut n'y avoir dans leur existence qu'un fait passager. De nouvelles expériences sont nécessaires pour faire cesser l'incertitude qui subsiste encore à ce sujet.

Nous concluons donc purement et simplement que le doute est permis au sujet de l'influence du poinçonnage sur la durée des constructions et qu'il ne résulte nullement de la supériorité de résistance à la rupture des tôles alésées sur les tôles poinçonnées qu'elles auraient une durée, égale à celle de ces dernières, si on augmentait leur coefficient de travail dans la proportion de leur supériorité au point de vue de la rupture immédiate.

Nous en restons là en ce moment et nous ajournons notre conclusion sur l'utilité de l'alésage à la fin de cette étude. Alors seulement nous aurons tous les éléments qui nous paraissent nécessaires pour motiver complètement notre avis sur cette importante question.

98. *Cisailage.* — Le cisailage des tôles produit une altération analogue à celle qui est due au poinçonnage. Toutefois les effets en sont bien moins marqués ; ainsi la résistance moyenne de la tôle n'en est pas sensiblement altérée et l'allongement n'est réduit que de moitié environ, lorsqu'on le mesure sur une bande de 50 millimètres de largeur et de 200 millimètres de longueur.

Enfin le pliage que peut subir sans se rompre une bande cisailée dans une tôle d'acier, qualité coque, s'éloigne peu de 70 à 80° tandis que celui d'une bande poinçonnée n'est que de 15 à 25°.

Une bande de même qualité ayant ses bords limés ou découpés à la raboteuse peut se replier bord sur bord de 180°.

L'étude des effets du cisailage a peu d'importance, parce qu'ils n'atteignent pas les sections dangereuses, qui sont celles où la barre est affaiblie par le perçage des trous ;

aussi ne donnerons nous pas plus de détails sur ce sujet.

99. *Résumé du chapitre.* — Nous croyons que les faits d'expérience que nous venons de faire connaître établissent d'une manière certaine que le poinçonnage altère gravement le fer et plus encore l'acier.

On serait surpris qu'il eût pu y avoir désaccord à ce sujet entre les Ingénieurs, si on n'en trouvait l'explication dans l'influence de la largeur des barreaux d'essai, qui a échappé à la plupart des observateurs, et qui peut transformer la diminution de résistance en une augmentation, lorsque l'écartement des trous de rivets est réduit à une valeur très faible, qu'on ne rencontre jamais dans les constructions, mais que certains observateurs ont adoptée dans leurs essais, faute probablement d'une machine d'essai assez puissante pour briser de fortes sections.

Nous regardons donc comme démontrés les faits que nous résumons ci-après.

Le poinçonnage produit une altération du métal, caractérisée surtout par l'augmentation de la limite d'élasticité et par une diminution beaucoup plus forte de l'allongement. Cette espèce d'écrouissage s'étend à 3 ou 4 millimètres autour du trou, en diminuant très rapidement d'intensité à partir du premier millimètre.

Outre l'écrouissage, l'action du poinçon produit des tensions intermoléculaires très intenses dans le métal voisin du trou.

Le métal poinçonné se brise pour une flexion ou un allongement beaucoup moindre que le métal foré. Sa rupture entraîne celle de toute la section.

La résistance moyenne d'une section poinçonnée, au moment où sa rupture totale est déterminée par celle du métal écroui, est très variable suivant l'écartement des trous. Supérieure de 15 p. 100 à la résistance normale du métal, pour une tôle d'acier de 10 millimètres, lorsque la dis-

tance des bords des trous est de quelques millimètres, elle lui devient égale, lorsque cette distance est voisine de 15 millimètres. Elle continue à diminuer quand la distance augmente, et atteint sa valeur minimum, lorsque cette distance est égale ou supérieure à 40 ou 50 millimètres, ce qui correspond à un écartement d'axe en axe de 60 à 70 millimètres.

La perte de résistance due au poinçonnage est alors de 20 p. 100 environ pour le fer et pour les aciers extra-doux, de 25 p. 100 pour les aciers assez doux et de 35 p. 100 pour les aciers durs.

Le recuit préalable augmente la perte de résistance due au poinçonnage, tandis que l'écaillage ou la trempe la diminue.

Le recuit après le poinçonnage ou l'enlèvement au foret d'une zone de 1 à 2 millimètres autour du trou suffit pour rendre au métal sa résistance normale.

L'alésage est le moyen le plus économique et le plus pratique de faire disparaître l'altération résultant du poinçonnage.

S'il s'agit d'une construction rivée à recouvrement ou à simple couvre-joint, l'influence du poinçonnage atteint une valeur bien plus grande encore que celles indiquées plus haut.

Le poinçonnage diminue énormément la résistance au choc des constructions rivées.

CHAPITRE VII.

DÉFORMABILITÉ ET RIGIDITÉ DES CONSTRUCTIONS.

100. *Déformabilité.* — Ce mot n'est pas français, nous l'employons néanmoins faute de mieux. Le sens que nous

lui donnons ressortira suffisamment des explications qui suivent.

On n'étudie habituellement que la résistance des constructions aux forces extérieures de valeur déterminée, et cependant une construction quelconque peut avoir à supporter un genre d'épreuve absolument différent : c'est celui qui résulte d'une déformation ayant une amplitude qui s'impose sous peine de rupture, et qui produit des efforts inconnus *à priori*.

La sécurité que présente une construction au point de vue de l'action de forces de valeur déterminée dépend uniquement de sa résistance, et augmente avec ses dimensions, tandis qu'au point de vue des déformations forcées, elle est absolument indépendante de la résistance et ne dépend que de la faculté de se déformer sans rupture.

Il est facile de trouver de nombreux exemples de ce dernier cas.

Dans une construction quelconque, si deux parties solitaires sont soumises à des températures suffisamment différentes, la rupture ne peut être évitée que par une déformation ; c'est le cas d'une façade de chaudière qui ne reçoit pas l'action de la flamme et qui est rivée à l'extrémité d'un corps cylindrique exposé au feu ; c'est aussi le cas des chaudières à bouilleurs réunis au corps cylindrique par des communications rigides, surtout lorsqu'elles sont à retour de flamme et que par suite le corps et les bouilleurs sont soumis à des températures différentes et s'allongent inégalement. Il suffit d'une faible différence de dilatation pour produire des dislocations dans certaines chaudières, où une grande longueur en multiplie les effets. Nous avons eu maintes fois l'occasion de l'observer.

Des efforts analogues peuvent être produits par le tassement vertical d'une ou plusieurs des piles qui supportent une poutre droite à plusieurs travées. La force de la construction ne lui permettant pas en général de se soutenir

sans porter sur tous ses appuis, le tassement d'une pile amènera un affaissement de la poutre qui produira ou ne produira pas la rupture, suivant que son mode de construction permettra ou ne permettra pas une déformation suffisante.

Il en serait de même d'un arc métallique, si ses culées venaient à s'écarter d'une quantité même assez faible, ou encore d'une porte d'écluse de grandes dimensions, que la présence d'un objet mal placé empêcherait de s'appuyer sur le busc sans se gauchir d'une manière exagérée... etc.

Enfin le même effet est produit fréquemment, mais à un degré bien moindre par les erreurs de tracé ou les irrégularités d'exécution. Dans un treillis à petites mailles par exemple, sur deux barres successives, il peut arriver que l'une soit trop courte et l'autre trop longue pour que les trous coïncident bien avec ceux de l'âme de la semelle. Si la construction est faite sans soins, et si les vices d'exécution sont corrigés à force de brochage, l'une des barres sera comprimée et peut-être fléchie, tandis que l'autre sera d'avance tendue au delà de sa limite d'élasticité.

Il nous semble inutile d'entrer dans plus de détails pour prouver que dans bien des cas la faculté de pouvoir se déformer sans se rompre est importante pour une construction.

101. Lorsqu'il s'agit de pièces non affaiblies par des trous, il n'y a en général aucun danger à craindre de ce chef, les aciers prenant toujours avant de se rompre des allongements de 10 à 30 p. 100 et les fers de 4 p. 100 à 25 p. 100, ce qui est plus que suffisant dans tous les cas que nous venons de signaler pour éviter les ruptures. Mais il en est tout autrement pour les constructions assemblées par des boulons et des rivets. En effet, pour donner au rivetage une force suffisante, on est conduit à percer des trous de rivets de dimensions telles que la section qu'ils

laissent aux barres à assembler varie en général entre les $\frac{70}{100}$ et les $\frac{80}{100}$ de la section entière.

S'il s'agit de fer poinçonné, nous avons vu que la résistance à la rupture du métal entre les trous est réduite de $\frac{20}{100}$ par l'altération due au poinçonnage; s'il s'agit d'acier poinçonné, la réduction peut varier de $\frac{20}{100}$ à $\frac{35}{100}$ et est voisine de $\frac{25}{100}$ pour les qualités les plus recommandables, assemblées dans les meilleures conditions, c'est-à-dire à double couvre-joint.

Par conséquent le rapport de résistance de la section poinçonnée à la section entière peut varier de $0,70 \times 0,80 = 0,56$ à $0,80 \times 0,80 = 0,64$ pour le fer poinçonné, et de $0,70 \times 0,75 = 0,525$ à $0,80 \times 0,75 = 0,60$ pour l'acier poinçonné de bonne qualité pour constructions.

La limite d'élasticité étant généralement voisine des $\frac{60}{100}$ de la résistance à la rupture, il arrivera donc souvent pour le fer et presque toujours pour l'acier que les sections poinçonnées se rompent avant que les sections entières dépassent la limite d'élasticité et, fournissent par conséquent un allongement suffisant pour permettre à la construction une déformation importante.

Lorsque les déformations nécessaires sont de peu d'étendue, comme c'est généralement le cas pour celles qui résultent de vices de construction, elles peuvent néanmoins être corrigées sans rupture par l'allongement élastique qui se produit pour les charges inférieures à la limite d'élasticité, et dont la valeur atteint en moyenne 1 millimètre par mètre pour le fer et 1^{mm},5 pour l'acier. En outre, avant de se rompre, les trous s'ovalisent, et les rivetages glissent d'une quantité variable avec la qualité des rivets, mais que

nous n'avons jamais trouvée inférieure à $1^{\text{mm}},5$. C'est grâce à ces deux effets que les constructions subsistent malgré les vices inévitables de l'exécution, mais c'est au prix de tensions intérieures fort notables et de glissements dans les rivetages, qui en réduisent évidemment la solidité.

Quoi qu'il en soit des propriétés de la matière qui permettent aux constructions poinçonnées de subsister malgré les vices d'exécution, il n'en reste pas moins établi que leur solidité est gravement compromise, lorsqu'elles ont à subir des déformations importantes, comme celles qui résulteraient pour les ponts de tassements de maçonneries.

Pour apprécier les avantages que l'alésage présente à ce point de vue, le mieux est de les préciser par des chiffres. Supposons qu'il s'agisse d'un assemblage où les trous ré-

duisent aux $\frac{80}{100}$ la section de barres d'acier ayant 60 kilogrammes de résistance et perdant 25 p. 100 par le poinçonnage.

Si le métal est poinçonné, la résistance de la section percée sera les $(1-0,25) \times 80 = 0,60$ de la résistance de la section pleine. La rupture aura donc lieu dans l'assemblage, avant que la barre travaille au delà de la limite d'élasticité, qui dépasse en général $0,60 R$; par suite la construction ne pourra s'allonger avant de se briser que de l'allongement élastique correspondant à $0,60 R = 36$ kilogrammes qui est égal à $0,000046 \times 36$ kilogrammes $= 0^{\text{m}},0016$ par mètre.

Si au contraire le métal est foré ou recuit, la résistance de la section percée sera les $\frac{80}{100}$ environ de la résistance

de la section pleine. Par suite, avant de se rompre, la barre travaillera à $0,80 R = 48$ kilogrammes et les courbes de déformation d'un métal résistant à 60 kilogrammes, que nous avons sous les yeux, prouvent que sous cette charge la barre prendra en moyenne 4 p. 100 d'allonge-

ment c'est-à-dire 25 fois plus que la barre poinçonnée.

Ce chiffre en dit plus que tous les développements possibles sur l'utilité du forage ou du recuit pour les constructions, qui peuvent être forcées de se prêter à une déformation, et on saurait rarement affirmer que cette éventualité ne se réalisera pas.

102. *Rigidité.* — On voit par ce qui précède que la déformabilité n'est nullement l'opposé de la rigidité, qualité des constructions qui prennent des flèches peu importantes sous l'action des efforts auxquelles elles doivent résister.

Tandis que la déformabilité dépend surtout du rapport de la résistance des sections dangereuses à celle des sections pleines, la rigidité varie avec les formes générales de la construction et avec la valeur absolue des efforts imposés aux sections pleines; car les sections dangereuses ont en général des longueurs relatives si peu importantes qu'on peut négliger les allongements qu'elles prennent sous les efforts généralement admis.

Il est évident que pour une poutre dont l'ouverture et la hauteur sont déterminées, ainsi que le type de construction, les flèches seront proportionnelles aux allongements et aux raccourcissements des longerons et des treillis. Vu la constance presque absolue (*) du coefficient d'élasticité pour le fer et pour toutes les qualités d'acier, ces allongements et ces raccourcissements seront eux-mêmes sensiblement proportionnels aux tensions et aux pressions par millimètre carré, qui se produiront dans la poutre. Par conséquent les constructions en acier seront plus flexibles que celles en fer, et cela d'autant plus que, le métal employé étant plus résistant, on lui imposera des charges plus fortes.

(*) Nous avons vu que la valeur du coefficient d'élasticité de l'acier dépasse en moyenne de $\frac{1}{10}$ celle du fer.

Il y a là une cause d'infériorité apparente pour les métaux à grande résistance, mais un examen attentif établit qu'en général son importance est insignifiante. Nous en trouvons la preuve dans le mémoire publié par M. l'Ingénieur Résal dans les *Annales des Ponts et Chaussées* (mars 1883).

L étant l'ouverture d'un pont, V la vitesse de la charge roulante et F la flèche statique que produirait la charge roulante ajoutée sans vitesse à la charge permanente, M. Résal établit que D, rapport des efforts dynamiques produits dans le métal par le passage en vitesse de la charge, aux efforts statiques correspondant à la même charge en repos, est donné par la formule :

$$D = 1 + V \frac{\sqrt{F}}{L}.$$

Pour faire disparaître F, nous admettrons qu'on ne considère que des ponts ayant un même rapport entre l'ouverture et la hauteur des poutres, et calculés avec un même effort maximum pour le métal, ce qui se réalise bien approximativement, au moins en France pour les constructions en fer. On sait que dans ce cas les flèches sont proportionnelles aux ouvertures, c'est-à-dire que $\sqrt{F} = K \sqrt{L}$ d'où il résulte :

$$D = 1 + \frac{VK}{\sqrt{L}}.$$

Pour obtenir la valeur de K, nous nous baserons sur les résultats des calculs de M. Résal, qui établissent que pour $V = 20$ mètres et $L = 20$ mètres, D est égal à 1,11. On a donc :

$$1,11 = 1 + \frac{K \times 20}{\sqrt{20}}, \text{ d'où on tire } K = 0,025.$$

En remplaçant K par cette valeur et en faisant $V = 20$ mètres, dans la formule précédente, on obtient :

$$D = 1 + \frac{0,025 V}{\sqrt{L}} = 1 + \frac{0,5}{\sqrt{L}}$$

On tire de cette formule les valeurs suivantes de $D - 1$, c'est-à-dire de l'augmentation proportionnelle de la fatigue du métal, qui résulte de la vitesse de la charge roulante :

Valeurs de l'ouverture

$$L \dots 1^m \quad 4^m \quad 16^m \quad 25^m \quad 50^m \quad 100^m.$$

Valeurs correspondantes de

$$D - 1 \quad 0,50 \quad 0,25 \quad 0,125 \quad 0,10 \quad 0,07 \quad 0,05.$$

On voit par ces chiffres que l'effet dynamique des charges roulantes, fort important pour les poutres en fer de très petite longueur, devient faible pour les ouvertures de 10 à 20 mètres et est à peu près négligeable pour les grands ouvrages. Pour une ouverture de 50 mètres par exemple, sa valeur n'est que de 7 p. 100 de l'effet statique de la surcharge.

Il est facile d'obtenir des chiffres correspondants pour les ouvrages en acier.

En effet pour deux ponts de même type général, les flèches sont proportionnelles aux efforts, divisés par les coefficients d'élasticité des métaux dont ils sont formés. Si donc on substitue au fer un acier soumis à des efforts 1,40 fois plus élevés par exemple, la flèche F' que prendra l'ouvrage deviendra égale à $1,40 F \times \frac{9}{10} = 1,26 F$.

La formule de M. Résal donnera donc la valeur de $D' - 1$ correspondant à la construction d'acier.

$$D' - 1 = V \sqrt{\frac{F'}{L}} = V \sqrt{\frac{F}{L}} \sqrt{1,26} = 1,12 (D - 1),$$

ce qui signifie que l'effet dynamique de la charge roulante ne sera augmenté que de 12 p. 100, si on substitue l'acier au fer, et comme ces 12 p. 100 portent sur un chiffre, qui n'est lui-même, pour un pont de 50 mètres d'ouverture, que les $\frac{7}{100}$ de l'effort statique, il est en somme évident

que la substitution de l'acier au fer dans une poutre de 50 mètres n'augmente l'effort du métal que des $\frac{7}{100} \times \frac{12}{100}$, soit de 0,84 p. 100, de l'effort statique dû à la surcharge, ce qui est négligeable.

Ces chiffres précis réduisent à néant l'objection tirée de la diminution de rigidité, que l'on a si souvent faite à l'emploi de l'acier dans les grandes constructions et nous verrons dans un autre chapitre que la flexibilité de ce métal donne au contraire à un autre point de vue une augmentation importante de sécurité.

CHAPITRE VIII.

INFLUENCE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES FERS ET DES ACIERS SUR LEURS PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.

103. Ce sujet a déjà fait l'objet de travaux considérables, et cependant il est loin d'être épuisé. Il nous semble inutile de le développer longuement dans cette note, parce que les Ingénieurs n'ont pas de laboratoires de chimie et ne pourraient que difficilement mettre à profit les connaissances qu'ils acquerraient à ce sujet. Nous nous bornerons aux faits les plus notoires.

104. *Carbone dans le fer.* — Plus le fer est pur, plus il est malléable. Toutes les impuretés augmentent sa dureté; le carbone notamment existe toujours dans le fer industriel à la dose de 0,05 à 0,20 p. 100 et lui communique un accroissement de résistance, avec la propriété de prendre la trempe.

105. *Soufre.* — Le soufre n'altère pas la résistance et la faculté de s'allonger que présente le fer essayé à froid;

mais il rend ce métal rouverin à la température du rouge cerise, ce qui est un grand défaut pour le travail de forge.

En outre le fer sulfureux est cassant vers la température de 360°, comme nous l'avons déjà dit au paragraphe 81.

106. *Silicium*. — Le silicium produit à peu près les mêmes effets que le soufre pour le travail à chaud; mais il diminue la ténacité à froid et la ductilité du fer.

107. *Phosphore*. — Le phosphore, à une teneur convenable, atténue les effets fâcheux que le soufre exerce sur les propriétés du fer à chaud, et le rend plus facile à souder et à travailler au feu. Il modifie d'une manière remarquable les propriétés du fer à froid et produit une notable augmentation de sa résistance statique avec une augmentation plus forte de sa limite d'élasticité, sans diminuer sa ductilité mesurée par l'allongement proportionnel.

Le phosphore améliore donc le fer au point de vue des efforts statiques, et on pourrait être tenté d'en conclure que les fers phosphoreux sont les meilleurs; malheureusement ils joignent à ces qualités une grande fragilité, qui en rend l'emploi dangereux pour les pièces exposées aux chocs, lorsque la proportion de ce métalloïde est trop forte.

M. Lebasteur cite un morceau de fer des Ardennes renfermant 0,37 p. 100 de phosphore et extrêmement fragile, qui avait cependant pour caractéristiques les chiffres suivants, qui semblent dénoter un excellent métal:

Limite d'élasticité, 30 kilogrammes.

Résistance à la rupture, 40 kilogrammes.

Allongement proportionnel, 22 p. 100.

On remarquera que le rapport $\frac{L}{R}$ atteint pour ce métal la valeur exceptionnelle de 0,75. Nous y reviendrons dans l'étude du choc.

108. *Scorie.* — La scorie qui reste interposée entre les fibres du fer agit d'une façon nuisible sur les propriétés du fer à chaud et à froid. Le fer est d'autant meilleur qu'il en a été mieux débarrassé par la préparation qu'il a subie. L'attaque par l'eau acidulée permet de comparer les fers à ce point de vue; elle se porte de préférence sur les parties où il reste des scories.

109. *Carbone dans l'acier.* — La teneur minimum de carbone que l'on trouve dans les aciers doux est de 0,10 à 0,15 p. 100. La teneur maximum dans les aciers durs est de 1,20 à 1,50 p. 100. Au delà de ce chiffre on obtient d'abord des produits intermédiaires entre l'acier et la fonte, puis des fontes normales.

La résistance, la fragilité et la propriété de prendre la trempe augmentent avec la teneur en carbone, tandis que la ductilité diminue.

110. *Manganèse.* — Le manganèse est un élément nécessaire de la fabrication industrielle de l'acier. Ajouté au bain métallique à la fin de l'opération, lorsqu'il n'y préexiste pas en quantité suffisante, il s'oxyde aux dépens d'une partie de l'oxyde de fer mélangé au métal, et forme avec ce qui en reste et avec la silice provenant de l'oxydation du silicium et de l'usure des revêtements une scorie très liquide, qui se sépare parfaitement du métal. Si on n'employait pas le manganèse, une partie de l'oxyde de fer resterait dans le métal et le rendrait rouverin et absolument incapable de supporter le laminage. Par suite de nécessités pratiques qu'il est inutile d'expliquer, il est impossible de n'ajouter au bain d'acier que la quantité de manganèse qui devra passer dans la scorie, et il en reste toujours au moins 0,15 à 0,20 dans les aciers doux et 0,20 à 0,50 dans les aciers durs.

Du reste, dans ces proportions, le manganèse ne nuit pas à la qualité de l'acier; il joue le même rôle que le carbone, mais il diminue moins que lui les allongements à égalité d'augmentation de résistance. Par conséquent le manganèse améliore l'acier au point de vue du travail total de déformation et augmente sa résistance aux efforts appliqués sans choc.

Mais le grand avantage du manganèse est de donner aux aciers durs une grande résistance, tout en leur conservant une ductilité suffisante; ce qui ne peut être obtenu avec le carbone seul.

La ductilité influant sur la résistance à la flexion, comme nous l'avons vu au chapitre IV, l'addition du manganèse permet donc d'augmenter la résistance à la flexion des aciers durs, ce que l'on ne peut réaliser par l'addition du carbone.

On n'est pas d'accord sur l'effet que produit le manganèse au point de vue de la fragilité au choc et de l'oxydabilité.

111. *Soufre*. — Le soufre influe peu sur les qualités des aciers à froid, mais il rend le laminage impossible, quand il existe en quantité notable. Par suite de ce fait, le constructeur est certain que le soufre n'existe jamais dans l'acier laminé ou forgé à une teneur qui soit préjudiciable pour son emploi, et il n'a pas à s'en préoccuper.

112. *Silicium*. — Le silicium existe rarement en quantité nuisible dans les aciers Martin-Siémens, tandis qu'il peut se trouver à une teneur élevée dans les aciers Bessemer obtenus en allure trop chaude. Si la proportion de silicium dépasse certaines limites, le métal est rouverin et impossible à laminer, comme l'acier trop sulfureux. Néanmoins un métal capable de supporter le laminage peut contenir une quantité de silicium suffisante pour altérer sa

résistance au choc et le rendre cassant. Au point de vue de la résistance et de l'allongement sous les charges appliquées sans choc, le silicium n'est pas nuisible, il augmente la résistance et diminue l'allongement, comme le ferait une moindre quantité de carbone.

On admet généralement que le silicium, à l'encontre des autres métalloïdes, diminue l'aptitude de l'acier à prendre la trempe.

113. *Phosphore.* — Le phosphore est le grand ennemi de l'acier. On peut laminier des aciers qui en renferment 0,40 p. 100 et même plus, à la condition qu'ils soient peu carburés. Ces aciers ont, comme les fers phosphoreux, une résistance et un allongement statique très satisfaisants, et même parfois supérieurs à ceux des aciers purs; mais ils sont extrêmement cassants et par suite très dangereux dans la plupart des emplois. En outre ils sont très sujets à la corrosion, ce qui porte à croire qu'ils auront une faible durée. Enfin ils ont une structure feuilletée, qui rend irrégulière la qualité du métal et qui en facilite la désagrégation. Pour les rails notamment, il y a là un inconvénient considérable et on peut citer telle fourniture de rails phosphoreux qui a dû être presque entièrement remplacée après un très petit nombre d'années de service, alors que les rails de bonne qualité posés à la même époque étaient tous en parfait état. Le champignon se fendait en prolongement des faces de l'âme ou dans d'autres directions, comme dans les rails en fer.

Cette structure générale feuilletée, que des yeux même peu exercés peuvent distinguer dans les cassures, permet de reconnaître la présence, d'un excès de phosphore sans analyse. Toutefois il ne faut pas la confondre avec l'apparence que donnent à certaines parties des cassures les soufflures aplaties sous le laminoir. L'une est générale et l'autre est locale.

Nous estimons que dans une fabrication bien réglée la teneur de l'acier en phosphore ne doit pas dépasser 0,03 à 0,04 p. 100 pour les tôles extra-douces destinées aux chaudières, 0,05 à 0,10 p. 100 pour les tôles et barres de construction et 0,10 à 0,12 p. 100 pour les rails.

114. *Formules de M. Deshayes.* — M. Deshayes, alors Ingénieur à Terrenoire, a donné dans son classement (*) des aciers deux formules qui déterminent l'une R, résistance à la rupture par extension, l'autre a' allongement p. 100 avant rupture, mesuré sur 100 millimètres de longueur. Ces deux quantités sont données en fonction des quantités de carbone, de manganèse, de phosphore et de silicium existant dans l'acier, exprimées en tant p. 100. Ces formules sont les suivantes :

$$R = 50^{kos} + 18 C + 56 C^2 + 18 Mn + 15 Ph + 10 Si,$$

$$a' = 42 - 56 C - 5,5 Mn - 6 Si.$$

Si on mesure l'allongement a sur 200 millimètres au lieu de 100 millimètres, et c'est l'usage adopté par la Marine et le chemins de fer, on trouve des valeurs qui ne sont pas absolument proportionnelles à celles de a' ; cependant on peut admettre comme approximation $a = 0,75 a'$. La seconde formule devient alors :

$$a = 51 - 27 C - 4,1 Mn - 4,5 Si.$$

Assurément ces formules ne sont pas absolues, mais pour le métal recuit, elles donnent une valeur approximative de la résistance d'un acier dont on connaît la composition chimique. Nous avons vu au chapitre V comment ces chiffres sont modifiés par les actions physiques que le métal a subies, lorsqu'il n'est pas recuit avant l'essai.

(*) *Classement et emploi des aciers.* — Dunod.

115. *Rapport* $\frac{L}{R}$. — Dans la suite de ce mémoire nous aurons souvent occasion de parler de $\frac{L}{R}$, rapport de la limite d'élasticité à la résistance de rupture. Il résulte d'essais nombreux faits par la Compagnie des forges de Terrenoire que dans les métaux recuits ce rapport est minimum pour les aciers purs, c'est-à-dire renfermant presque exclusivement du fer et du carbone et qu'il est alors voisin de 0,50.

Le rapport $\frac{L}{R}$ augmente notablement avec la teneur en manganèse et surtout avec la teneur en phosphore. Pour les aciers très impurs il peut atteindre 0,65 à 0,70.

Pour des métaux d'égale pureté, mais présentant des résistances inégales par suite d'une teneur différente de carbone, le rapport $\frac{L}{R}$ a à peu près la même valeur, ou en d'autres termes la limite d'élasticité augmente proportionnellement à la résistance pour les métaux de composition similaire différant seulement par la teneur en carbone.

CHAPITRE IX.

ESSAIS SUR LA RÉSISTANCE DU FER ET DE L'ACIER A LA CORROSION.

116. — Il y a peu de sujets plus controversés que la résistance du fer et de l'acier à la corrosion par l'eau et par l'air humide. Certains expérimentateurs ont conclu de leurs essais que l'acier résistait mieux que le fer à ces deux genres de destruction ; d'autres, qu'il y résistait moins bien ; d'autres enfin, qu'il résistait mieux à l'un et moins bien à

l'autre. Le désaccord est aussi complet au sujet de l'influence qu'il faut attribuer dans la corrosion au carbone, au manganèse et aux autres impuretés.

Les études que M. Savioz, chimiste des Forges de Saint-Nazaire, a bien voulu faire sur notre demande, ont mis en lumière un fait qui éclaire la question et peut expliquer les conclusions contradictoires des divers observateurs. C'est l'influence prépondérante que le phosphore exerce sur la corrosion de l'acier par l'eau acidulée. Les deux séries d'essais ont été faites avec un même liquide, contenant 5 volumes d'eau pour 1 volume d'acide chlorhydrique pur, et l'immersion a eu une égale durée de 24 heures. Néanmoins on ne peut pas les comparer entre elles, parce que la proportion du poids du métal immergé au poids de l'acide était très différente dans les deux séries.

On ne doit donc comparer que les essais d'une même série.

Première série.

DÉSIGNATION du métal	ANALYSE P. 100					ESSAIS MÉCANIQUES		PERTE de poids en 24 heures	OBSERVATIONS
	Mn	C	S	Ph	Si	R	a		
A. Bessemer. . .	0,17	0,195	non dosé	0,06	non dosé	kl. 43,8	p. 100 18,0	p. 100 4,02	Tol. épais. 12 ^m
Idem.	0,29	0,20	»	0,07	»	45,5	26,0	2,62	— 10
Idem.	0,27	0,22	»	0,17	»	61,3	16,0	16,35	— 10
Idem.	0,42	0,195	»	0,06	»	46,6	24,0	3,70	— 12
A. Martin. . . .	0,15	0,20	»	0,07	»	47,0	22,0	3,90	— 9
Idem.	1,00	0,23	0,045	0,168	tr.	70,6	16,0	20,80	— 10
Fer n° 4.	Moyenne de cinq essais							14,00	

Deuxième série.

DÉSIGNATION du métal		ANALYSE P. 100					DENSITÉ	PERTE p. 100 par l'attaque aux acides	OBSERVATIONS
		Mn	C	S	Ph	Si			
<i>Acier</i>									
A. Bessemer. . .	H	0,57	0,67	Environ 0,035 p. 100	0,216	tr.	7,777	10,20	La lettre H indique le haut du lugot et la lettre B le bas du lugot. L accolade indique que les deux échantillons proviennent du même lugot.
Idem.	B	0,55	0,59				7,796	7,81	
Idem.	H	0,88	0,61		0,250	tr.	7,836	6,87	
Idem.	B	0,86	0,55				7,816	5,78	
Idem.	H	1,12	0,66		»	»	7,806	2,41	
Idem.	B	1,10	0,69		»	»	7,813	1,93	
Idem.	H	1,08	0,82		0,08	»	7,807	1,34	
Idem.	B	1,08	0,79				7,813	1,20	
Idem.	H	0,30	0,90		0,06 à 0,08	»	7,801	1,71	
Idem.	B	0,30	0,80				7,780	1,47	
Idem.	H	1,15	1,10	0,06	»	7,782	1,16		
Idem.	B	1,13	1,10			7,798	1,03		
Idem.	H	0,26	0,19	»	»	7,778	1,78		
Idem.	B	0,26	0,18			7,829	1,55		
A. Martin. . . .	B	0,17	0,22	0,035	0,035	tr.	7,625	3,57	
Idem.	B	0,17	0,27	»	»	»	7,623	3,18	

Au premier examen, on reconnaît qu'en moyenne la perte de poids du métal augmente plus que proportionnellement à sa teneur en phosphore et que l'influence de ce métalloïde prime les autres à tel point qu'elle peut les masquer complètement. Pour une augmentation de phosphore de 0,10 p. 100 la perte de poids est quadruplée.

L'influence du carbone paraît négligeable, puisque l'on trouve une perte de poids à peu près identique pour des aciers d'égale pureté, qui en contiennent de 0,18 à 1,10 p. 100.

L'influence du manganèse admise par plusieurs auteurs est aussi contestable, attendu que des aciers en renfermant de 0,26 à 1,15 ont été également corrodés.

Un autre fait que l'on peut constater, c'est que l'acier provenant du bas du lingot est sensiblement moins attaqué que le métal provenant du haut du lingot. Cette différence résulte assurément de ce que les lingots renferment beaucoup moins d'impuretés dans leur partie inférieure, que dans leur partie supérieure, comme l'ont démontré de nombreuses analyses.

On remarquera aussi que, si la corrosion du fer a été un peu moindre que celle des aciers renfermant 0,17 de phosphore environ, elle a été quatre fois plus forte que celle des aciers purs renfermant 0,05 à 0,08 de phosphore.

Nous croyons pouvoir conclure de ce qui précède que le phosphore exerce sur la corrosion de l'acier par l'eau acidulée une action tellement prépondérante qu'il faudrait agir sur des aciers renfermant une dose identique de ce corps pour reconnaître l'action des autres impuretés, qui semble négligeable au point de vue industriel.

Quelque différence que puissent présenter l'effet des acides et celui de l'air atmosphérique humide, l'action du phosphore, est trop prépondérante dans l'attaque aux acides pour qu'il ne paraisse pas probable qu'elle a une grande importance, quel que soit l'agent d'oxydation, et il

est vraisemblable que, si le fer a plus de durée que les aciers impurs, il en a beaucoup moins que les aciers que donne couramment l'emploi des minerais de Bilbao et d'Algérie ou celui des procédés de déphosphoration Thomas et Gilchrist.

Il serait important de faire de nouveaux essais en dosant très exactement les impuretés contenues dans le métal et notamment le phosphore.

Cahors, le 8 décembre 1884.

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE.

TABLEAU N° I

Barreau en acier pour construction. — Diamètre primitif 9^{mm},5. — Section primitive 70^{mm},88. — Distances entre les repères 200 millimètres.

EFFORTS total E	ALLONGEMENTS p. 100 entre repères a	DIAMÈTRES des sections minima D	SECTIONS MINIMA du barreau S ou S'	TENSIONS PAR millimètre carré des sections minima T	ALLONGEMENTS p. 100 dans les sections minima A	
1	2	3	4	5	6	
kil.		mm.	mm.	kil.		
200		9,500	70,892	2,821	0,014	
400		9,499	70,867	5,644	0,028	
600		9,498	70,852	8,468	0,042	
800		9,497	70,837	11,293	0,056	
1000		9,496	70,822	14,119	0,070	
1200		9,495	70,807	16,947	0,084	
1400		9,494	70,792	19,676	0,098	
1600		9,493	70,777	22,606	0,113	
1800		9,492	70,762	25,437	0,128	
2000		9,491	70,747	28,269	0,145	
2200		9,490	70,733	31,102	0,170	
2400		9,489	70,718	33,937	0,220	
2600	1,000 (1)	9,450 (2)	70,138	37,069	1,060 (3)	} Limite d'élasti- cité.
2800	1,500	9,420	69,693	40,176	1,700	
3000	2,120	9,380	69,102	43,410	2,570	} Commencement de la striction.
3200	2,870	9,330	68,446	46,752	3,550	
3400	3,500	9,270	67,491	50,377	5,020	
3600	4,250	9,200	66,476	54,154	6,620	
3800	5,875	9,080	64,753	58,684	9,460	
4000	7,875	8,860	63,655	62,838	11,350	
4100	10,250	8,620	58,358	70,259	21,460	
4000	11,000	8,500	56,745	70,490	24,910	
3950	11,375	8,360	54,891	71,997	29,160	
3900	11,750	7,740	46,751	83,420	51,610	
3850	11,875	7,250	41,182	93,487	72,360	} Rupture.
3800	12,000	6,710	35,361	107,520	100,450	

Limite d'élasticité comprise entre 34 et 37 kilogrammes.

Résistance usuelle à la rupture rapportée au millimètre carré de section primitive $\frac{4\ 100}{70,80} = 57^k,8.$

Allongement entre repères 12 p. 100.

Résistance rapportée au millimètre carré de section de rupture $\frac{3\ 800}{35,35} = 107^k,520.$

Allongement dans la section de rupture 100,45 p. 100.

(1) Les allongements n'ont pu être mesurés exactement au-dessous de la limite d'élasticité faute d'instruments assez précis.

(2) Au-dessous de la limite d'élasticité on m'a constaté aucune diminution du diamètre, le Palmer ne permettant pas de mesurer les millièmes de millimètre; les douze premières valeurs du diamètre n'ont donc pas été obtenues expérimentalement; elles ont été calculées d'après la valeur connue du coefficient d'élasticité. Les douze premiers nombres de la 6^e colonne ont de même été calculés.

(3) Les différences que les allongements inscrits dans la 2^e et la 6^e colonne présentent entre la limite d'élasticité et le commencement de la striction viennent de l'insuffisance de longueur du barreau. Les parties voisines des têtes ont comme d'habitude subi une moindre diminution de section que le reste du barreau et l'allongement entre repères en a été diminué.

TABLEAU N° 2

Barreau de fer ordinaire. — Diamètre primitif 9^{mm},5. — Section primitive 70^{mm},88. —
Distance entre les repères 100 millimètres.

EFFORTS totaux E 1	ALLONGEMENT p. 100 entre repères a 2	DIAMÈTRES des sections minima D 3	SECTIONS MINIMA du barreau S ou S' 4	TENSIONS par millimètre carré des sections minima T 5	ALLONGEMENTS p. 100 dans les sections minima A 6	
kil.		mm.	mm.	kil.		
200		9,500	70,882	2,82	0,014	
400		9,499	70,867	5,64	0,028	
600		9,498	70,852	8,47	0,042	
800		9,497	70,837	11,29	0,055	
1000		9,496	70,822	14,12	0,070	
1200		9,495	70,807	16,95	0,086	
1400		9,494	70,792	19,68	0,103	
1600		9,493	70,777	22,61	0,122	
1800		9,492	70,762	25,44	0,160	
2000	1,00 (1)	9,440 (2)	69,859	28,63	1,200 (3)	} Limite d'élasticité.
2200	1,50	9,370	68,920	31,88	2,600	
2400	2,00	9,290	67,710	35,45	4,600	
2600	3,25	9,190	66,300	39,21	7,400	
2800	5,00	9,08	64,753	43,24	9,500	
2900	6,00	9,00	63,580	45,61	11,500	Rupture

Limite d'élasticité comprise entre 26 et 28 kilogrammes.

Résistance usuelle à la rupture rapportée au millimètre carré de section primitive $\frac{2900}{70.88} = 40^k,9$.

Allongement entre repères espacés de 100 millimètres = 6 p. 100.

Rupture avant la striction causé par un défaut local.

(1) et 2). Voir les notes (1) et (2) du tableau précédent qui s'appliquent à celui-ci.

(3) La note (3) du tableau précédent s'applique *à fortiori* à celui-ci. — La longueur entre repères étant moindre, l'influence des têtes a été plus importante.

TABLEAU N° 3

Barreau de fonte grise de construction. — Diamètre primitif 19^{mm},8. — Section primitive 508 millimètres carrés. — Distances entre les repères 501 millimètres.

EFFORTS totaux	TENSIONS par millimètre carré	ALLONGEMENTS totaux pour 100	ALLONGEMENTS permanents pour 100	ALLONGEMENTS élastiques pour 100	
kil.	kil.				
300	0,97	0,000	0,000	0,000	
600	1,94	0,023	0,013	0,010	
900	2,91	0,063	0,033	0,030	
1200	3,88	0,067	0,017	0,050	
1500	4,85	0,110	0,040	0,070	
1800	5,82	0,170	0,067	0,103	
2100	6,79	0,220	0,070	0,150	
2400	7,76	0,270	0,100	0,170	
2700	8,73	0,350	0,150	0,200	
3000	9,70	0,490	0,240	0,250	
3300	10,67	0,700	0,390	0,310	
3500	11,30	N'ont pu être mesurés.		Rupture.	

Résistance à la rupture rapportée au millimètre carré de section primitive 11^k,30.