

*Méthode Brinell pour déterminer  
la dureté et les autres propriétés du fer et de l'acier.*

Le mémoire en question, également présenté par M. AXEL WAHLBERG, fait suite à une notice publiée par le même auteur dans le *Journal de l'Institut du fer et l'acier* (1901, n° I, pp. 243 à 298). Il comprend 40 pages et est accompagné de nombreuses planches. Nous ne pouvons en donner ici qu'un résumé.

I

*Influence des différents modes de recuit et de trempe sur  
les propriétés de tension du fer et de l'acier déterminées au moyen  
d'essais de tension.*

En 1897, Brinell se livra à des recherches étendues dans le but de déterminer l'influence des différents modes de recuit et de trempe sur les propriétés malléables du fer et de l'acier appréciées au moyen des essais à la traction.

Les résultats de ces recherches furent exposés dans la section des usines Fagersta, de l'Exposition Scandinave, tenue en la dite année à Stockholm. Mais cette série d'essais était incomplète, par exemple en ce qui concerne la diversité des modes de traitement préalable, de même en ce qui concerne la composition chimique, parallèlement auxquelles les propriétés élastiques des matières n'étaient pas déterminées. Brinell entreprit des recherches nouvelles, et les résultats de celles-ci figurèrent à la dernière Exposition de Paris, par les soins des usines précitées.

Les matières essayées dans cette nouvelle série d'expériences consistaient en treize sortes d'acier, variant beaucoup en composition, chacune desquelles était soumise à trente et un modes différents de traitement, avant les essais finaux de tension, les éprouvettes étant de mêmes formes et dimensions, c'est-à-dire, des barres rondes de 18<sup>m/m</sup> de diamètre. Le nombre total d'essais de tension

était ainsi de  $13 \times 31 = 403$ , sans tenir compte des essais supplémentaires nécessités dans un grand nombre de cas, comme, par exemple, dans celui d'acier contenant un pourcentage de carbone quelque peu élevé, vu que les barres éprouvettes d'un tel acier sont très aisément déformées quand elles sont trempées et sont ainsi sujettes à se briser à un des bouts si elles sont essayées sans un recuit préalable.

Toutes les opérations du traitement préalable ont été effectuées aux usines Fagersta, et les essais de tension au laboratoire pour l'essai des matériaux de l'Ecole Royale technique supérieure, à Stockholm.

#### A. — Programme du traitement préalable.

Les différents modes de traitement auxquels les matières respectives ont été soumises sont indiqués dans le tableau ci après :

I. — Laminé à chaud sans aucun traitement ultérieur.

II. — Recuit, avec refroidissement lent subséquent, aux températures suivantes :

a)	350° C.
b)	750° C.
c)	850° C.
d)	1,000° C.
e)	1,100° C.
f)	1,200° C.

III. — Trempé dans l'eau à une température de  $+ 20^{\circ}$  C. :

a) Chauffé, préalablement à la trempe, à 750° C. :

1. Sans recuit subséquent ;
2. Recuit à 350° C.
3. Id. 550° C.
4. Id. 650° C.

b) Chauffé, préalablement à la trempe, à 850° C. :

- 1, 2, 3 et 4 comme ci-dessus ;

c) Chauffé, préalablement à la trempe, à 1,000° C. :

- 1, 2, 3 et 4 comme ci-dessus.

IV. — Trempé dans l'huile à une température de  $+ 80^{\circ}$  C. :

a) Chauffé, préalablement à la trempe, à 750° C. :

1. Sans recuit subséquent ;
2. Recuit à 350° C.
3. Id. 550° C.

b) Chauffé, préalablement à la trempe, à 850° C. :

- 1, 2, 3 comme ci-dessus ;

c) Chauffé, préalablement à la trempe, à 1000° C. :

- 1, 2 et 3 comme ci-dessus.

V. — Trempé dans le plomb à une température de 550° C. :

- |    |                         |          |
|----|-------------------------|----------|
| 1. | Chauffé préalablement à | 750° C.  |
| 2. | Id.                     | 850° C.  |
| 3. | Id                      | 1000° C. |

### B. — Matériaux d'essais.

Dans cette série d'essais, on fit exclusivement usage d'acier sur sole, acide, produit aux usines Fagersta. Dans un grand nombre d'exemples, comme dans le cas des plus forts pourcentages en soufre, les charges respectives étaient faites spécialement dans ce but particulier. Le pourcentage en silicium et en manganèse était fort au-dessus de celui que l'on rencontre généralement dans les produits suédois.

Les lingots obtenus de onze des treize charges décrites étaient parfaitement sains, avec seulement un léger état de spongiosité. Ce défaut était de minime importance, attendu qu'il se rencontrait seulement près du sommet des lingots, partie qu'on pouvait enlever. Ce résultat favorable était très vraisemblablement dû à la haute température finale, mais il est très probable que des lingots sains auraient également été obtenus à une basse température, par suite du haut pourcentage en silicium. Dans aucun cas, il n'y avait formation de soufflures à la surface.

Le traitement mécanique était différent suivant qu'il s'agissait de lingots de 8 ou de 10 pouces, les premiers étant ramenés à 5 1/2 pouces par laminage et les derniers par forgeage. Tous les blooms ainsi obtenus étaient laminés en une chaude en barres rondes de 32 millimètres, bien que les résultats d'essais ne dussent pas vraisemblablement être influencés par cette circonstance, à un degré appréciable.

Après le laminage terminé, les barres d'essais étaient soumises au refroidissement, en évitant soigneusement tout contact avec les plaques du pavement, et, après refroidissement suffisant, elles étaient coupées à longueurs convenables pour être tournées à 18 millimètres, diamètre normal des éprouvettes.

### C. — Recuit et trempe des éprouvettes.

Le four imaginé par Brinell pour la trempe ressemble quelque peu au four à moufle ordinaire, bien qu'il en diffère en ce que les gaz de combustion passent en partie à travers le fourneau, mais de telle manière que les barres d'essais soient exposées aussi peu que

possible au contact direct avec eux, l'entrée et la sortie étant placées à un niveau plus bas que celui auquel les extrémités inférieures des barres sont placées.

Dans le cours de ces expériences, on a trouvé que ce dispositif permettait non seulement de régler la température comme on le désirait, mais aussi de la maintenir à un taux uniforme. La détermination de la température s'obtenait au moyen du pyromètre électrique Le Chatelier.

Brinell a également imaginé un dispositif pour supporter les éprouvettes dans le dit four, dans une position verticale, et au centre de ce dernier.

Au moyen de cet appareil, Brinell atteignait le double but de chauffer uniformément toutes les barres d'une même série et également de traiter simultanément des spécimens des diverses sortes, au nombre de 30.

Comme d'habitude, la température du fourneau, lors de l'introduction des éprouvettes, devait être de 100 à 200° C. en-dessous de la température à laquelle elles devaient être trempées. Pour atteindre la température voulue, ces éprouvettes séjournaient dans le four en moyenne pendant environ une heure.

Aux hautes températures de 1,000 à 1,200° C., le temps nécessaire était plus considérable qu'aux plus basses. Toutes les éprouvettes étaient retirées en même temps avec le support et plongées aussi rapidement que possible dans le liquide de trempage, en maintenant l'agitation jusqu'au refroidissement complet.

#### D. — Résultats d'essais.

Les résultats des divers essais de tension dans cette série de recherches sont donnés dans cinq tableaux et sont groupés sous les rubriques suivantes :

- 1<sup>er</sup> tableau : Eprouvettes recuites et lentement refroidies.
- 2<sup>e</sup> — : Eprouvettes trempées à 750° C. dans l'eau et dans l'huile.
- 3<sup>e</sup> — : Eprouvettes trempées à 850° C. dans l'eau et dans l'huile.
- 4<sup>e</sup> — : Eprouvettes trempées à 1,000° C. dans l'eau et dans l'huile.
- 5<sup>e</sup> — : Eprouvettes trempées dans le plomb.

Dans un but de facilité, les diverses espèces de matériaux d'essais sont classées d'après le pourcentage en carbone et sont réparties en trois groupes seulement :

- Groupe I. Acier dur : Teneur moyenne en carbone, 0.84 % ;  
 » II. Acier doux : » » 0.39 »  
 » III. Acier très doux (presque du fer) : Teneur moyenne en carbone, 0.20 %.

1. — *Recuit et refroidissement lent.*

On sait depuis longtemps que le fer, ou l'acier spécialement, s'il est travaillé à froid, acquiert, par le chauffage à la température bleue de recuit, une augmentation sensible de résistance et, dans certains cas exceptionnels, de ténacité. Les propriétés élastiques sont, en même temps, accrues, ou, en d'autres termes, par suite d'un tel traitement, la qualité de la matière est améliorée sous tous rapports.

Les présentes recherches ont confirmé cette connaissance. Ainsi, il a été noté en premier lieu que la limite élastique réelle est élevée par le chauffage jusque 350° C., respectivement aux taux suivants :

Dans le groupe I . . . . .	de 28 % ;
» II . . . . .	de 24 »
» III . . . . .	de 23 »
Echantillon à 0.09 % en carbone . . .	de 20 »

Par rapport à la ductilité, il y a aussi amélioration, le degré d'accroissement étant respectivement dans les trois groupes et dans l'échantillon isolé considéré, de 9, 5, 12 et 38 %.

On trouve que le chauffage jusque 350° C. augmente considérablement l'élasticité et la ténacité de la matière, sans affecter les propriétés de résistance absolue dans des proportions appréciables ; ce fait mérite d'être retenu.

Les résultats obtenus par les présentes expériences diffèrent entièrement des renseignements fournis par les métallurgistes les plus éminents. Il n'y a conséquemment rien d'étonnant à ce que la différence soit encore plus marquée quant aux résultats du recuit à des températures plus élevées. Selon ce qui paraît être l'opinion la plus accréditée, la matière forgée est rendue plus douce par le recuit et le refroidissement lent subséquent, tandis que, en même temps, la résistance et les propriétés élastiques sont réduites. A un point de vue général, ceci est sans doute parfaitement vrai et complètement d'accord avec les changements de structure déterminés par le traitement mécanique. C'est un dicton, en ce qui concerne de semblables cas de recuit, que ce qui est gagné en ténacité est perdu en résistance et en élasticité, et que c'est seulement dans le cas de matière non forgée,

tels que les lingots et les moulages, qu'une amélioration de toutes les propriétés physiques se produit en suite du recuit avec refroidissement subséquent, soit lent, soit brusque.

Les présents résultats d'essais montrent, en règle générale, qu'un recuit judicieux produit une amélioration marquée tant dans les propriétés de malléabilité que de ductilité. Par exemple, en examinant les résultats moyens de recuit jusque 1000° C., on trouve qu'une amélioration générale se produit par rapport aux diverses propriétés dans les proportions suivantes :

	Limite d'élasticité	Limite de déformation	Limite de rupture	Allongement
	‰	‰	‰	‰
Groupe n° I	44	19	8	11
» II	44	20	2	12
» III	40	28	3	15
Échantillon isolé	48	26	2	39

## 2. — Trempe dans l'eau.

a) *Recuit préalable à 750° C.* — De récentes recherches ont établi, sans le moindre doute, contrairement à la théorie qui prévalait autrefois, que les températures de 700 et de 600° C. respectivement, ne doivent nullement être regardées comme représentant les limites entre lesquelles, dans le cas d'un refroidissement gradué, le carbone de trempe est changé en carbone de ciment, puisque en fait cette transformation se produit à une température plus élevée. Ainsi, dans le cas d'une matière contenant 0.89 ‰ de carbone, cette transformation se produit à environ 700° C., mais, avec tout autre pourcentage en carbone, elle se produira à une période moins avancée du refroidissement. Avec 1.0 ‰ de carbone, ce changement se produit déjà à 800° C., tandis que dans le cas de pourcentages plus élevés que 1.0 ‰ ou moindres que 0.25 ‰, il se produit au-delà de cette limite.

En considérant de plus que, dans le cas d'un nouveau recuit, le carbone de ciment formé à la suite d'un refroidissement préalable prend à nouveau l'état de carbone de trempe, sauf à une température de 40° C. environ au-dessus de celle à laquelle la transformation

antérieure a eu lieu, il ne peut être affirmé qu'une température de recuit de 750° C. suffira toujours pour produire la transformation du ciment en carbone de trempe, bien que, occasionnellement, cela puisse avoir lieu.

Selon les recherches de Brinell, il paraît aussi que cette transformation n'est pas effectuée par le recuit à 750° C. ou tout au plus seulement dans une proportion limitée. Dans les essais de trempe dont il s'agit, ceci peut être dû en partie à un refroidissement partiel des éprouvettes pendant qu'elles étaient extraites du four pour être plongées dans le liquide de trempe, occasionnant peut-être une formation commençante de carbone de ciment qui rend la trempe moins effective.

Il semble, néanmoins, que ces altérations, qui se produisent apparemment dans la plupart des éprouvettes quand elles sont trempées, peuvent être regardées comme possédant un caractère purement physique. Elles sont, de plus, complètement effacées simplement par un réchauffement subséquent de la matière à 350° C. seulement. Cette théorie paraîtrait être aussi corroborée par le fait que la diminution de ductilité, en suite de ce traitement, est sensiblement plus considérable dans le cas de matières plus douces que dans celui de matières plus dures. Selon les valeurs comparatives de l'allongement dans le tableau rapportant les essais de trempe à 750° C. dans l'eau, et sans recuit subséquent, les degrés suivants de décroissement ou d'accroissement, suivant le cas, sont à noter :

Dans le groupe I. — Ductilité augmentée de 15 %.				
Id.	II. —	Id.	id.	14 %.
Id.	III. —	Id.	id.	33 %.
Echantillon isolé. —		Id.	id.	40 %.

Si cette altération des propriétés physiques était, dans une forte proportion, due à la transformation du carbone, elle serait, conséquemment, plus accentuée dans les degrés croissants de pourcentage en carbone. Mais d'après les renseignements ci-dessus, le contraire paraît être le cas.

Le fait que, dans le cas de l'acier le plus dur (groupe I, carbone 0.84 %), la ductilité, au lieu de décroître, commence à croître, est remarquable et difficile à expliquer. Toutefois, de l'examen des divers essais de ce groupe, on ne peut nullement considérer cette particularité comme accidentelle.

Il semblerait que les changements dans l'acier, consécutifs à la

trempe à 750° C. sans recuit subséquent, pourraient être comparés à ceux effectués par le travail à froid dont l'action du traitement sur la réduction des propriétés ductiles est aussi plus effective dans les matières plus tendres que dans les plus dures. Mais il y a, d'autre part, une différence marquée entre les deux modes de traitement par rapport à la limite réelle élastique, le dernier mode tendant à élever cette limite, tandis que le premier a l'effet inverse. Dans les groupes I, II, III et l'échantillon isolé, les taux de ce décroissement sont respectivement de 25, 20, 33 et 7 %, D'autre part, les limites de déformation permanente et de rupture seront en moyenne élevées par rapport à la trempe et spécialement aussi dans le cas de matières plus douces, où les valeurs des points de déformation permanente et de charge de rupture sont augmentées respectivement de 77 et de 72 %.

Après réchauffement jusque environ 350° C., la perte en ductilité due à la trempe n'est pas seulement retrouvée, mais les valeurs de l'allongement sont même plus élevées que celles obtenues dans le cas des éprouvettes avant traitement, tandis que les valeurs de charge de rupture, soit augmentées soit réduites par rapport à cette trempe, deviennent de nouveau environ les mêmes que celles rencontrées dans les éprouvettes primitives.

Quant aux valeurs de la limite réelle d'élasticité, la perte sous ce rapport ne sera pas restituée par le réchauffement seulement à 350° C., mais la température de 550° C. a été trouvée amplement suffisante à cette fin. Les matières sulfureuses, quand elles sont traitées de la manière décrite ici, montrent d'une façon générale les mêmes tendances et allures. De ces résultats il peut être sûrement conclu que la trempe à la température de 750° C. doit être évitée, soit avec, soit sans recuit ultérieur.

*b) Recuit préalable à 850° C.* — Cette température de trempe paraît devoir être la plus convenable pour toutes les diverses matières de la série considérée, excepté pour deux échantillons sulfureux qui semblent acquérir une trempe plus énergique seulement quand ils sont recuits jusqu'à 1000° C. L'examen des résultats montre que, dans le cas des matières les plus dures, quand elles sont trempées à cette température sans recuit subséquent, ou réchauffées seulement jusque 350° C., les essais de tension ont pour la plupart échoué. Le fait est que, en dépit du soin pris pendant la trempe, la matière avait souffert quelque déformation donnant lieu à un certain effort de flexion.

Par rapport à l'altération des propriétés physiques dans le cas



présent, l'influence prédominante doit être sans aucun doute attribuée au changement d'état du carbone, comme on peut le voir en comparant les valeurs réduites d'allongement dans les éprouvettes non recuites. Le taux de ce décroissement dans les groupes II, III et l'élément isolé, sont respectivement de 96, 69 et 39 %; il n'y a eu aucun résultat d'essai valable pour le groupe I. Les taux décroissants progressent ainsi en sens inverse comparativement au décroissement correspondant indiqué ci-dessus dans le précédent cas de trempe à 750° C., où la matière la plus douce a subi la plus grande détérioration.

Un fait remarquable est qu'un décroissement considérable dans les valeurs de la limite d'élasticité est à noter dans la plupart des cas de cette opération de trempe. Il est à présumer que cela est dû au développement de certains efforts dans la matière, pendant la trempe, qui influencent défavorablement les propriétés élastiques. C'est seulement au moyen d'un recuit subséquent, jusque 550° C., que l'on obtient une plus haute valeur pour cette limite, bien qu'en général, cela sera au détriment du point de déformation permanente et de la charge de rupture. Consécutivement à ce nouveau recuit à 550° C., l'accroissement des valeurs de limite d'élasticité, comparées aux valeurs obtenues dans les éprouvettes avant d'être traitées, est trouvé être :

Dans le groupe I . . . . .	148 %
Id. II . . . . .	143 »
Id. III . . . . .	63 »
Echantillon isolé . . . . .	47 »

Par ce traitement de recuit, la perte en tenacité est aussi entièrement retrouvée, bien que les valeurs d'allongement restent encore inférieures à celles obtenues en essayant les éprouvettes primitives, excepté dans le cas de l'échantillon isolé. La dite matière a été notablement améliorée sous tous rapports par la trempe à 850° C., avec recuit subséquent à 550° C.

c) *Recuit préalable à 1,000° C.* — Bien que la température de trempe de 850° C. paraisse en réalité la plus convenable, en ce qui concerne les propriétés de tension de l'acier, il semble que le recuit préalable peut, sans aucun inconvénient, être porté à la température relativement élevée de 1,000° C. Il est vrai que la qualité des aciers appartenant au groupe I, c'est-à-dire des plus durs, doit souffrir dans une certaine mesure d'un tel accroissement de la température de trempe, mais en général la détérioration

ne sera pas importante. Le décroissement remarquable dans les valeurs de l'allongement ci-dessus rapportées indique probablement un surchauffement, tandis que, d'autre part, la même matière résiste parfaitement à un recuit qui n'est pas moindre que 1,200° C. avec un lent refroidissement consécutif, sans souffrir aucune détérioration. Cette contradiction apparente sera probablement expliquée par l'examen métallographique.

Dans le groupe II (teneur moyenne en carbone 0.39 %), il y a plusieurs exemples dans lesquels la trempe est plus énergique à 1,000° C., qu'à 850° C. Ainsi, en comparant les valeurs des essais obtenues à ces températures respectivement, dans chaque cas, avec recuit subséquent à 350° C., les degrés d'accroissement et de décroissement sont les suivants :

	<i>Température de trempe</i>	
	850° C.	1000° C.
Limite d'élasticité, accroissement . . . . .	73 %	132 %
Limite de déformation permanente, accroissement . . . . .	170 »	218 »
Charge de rupture, accroissement . . . . .	166 »	90 »
Allongement, décroissement . . . . .	84 »	83 »

On rencontre aussi un décroissement analogue de l'effet de la trempe dans l'élément isolé quand il est trempé respectivement à 850° et 1,000° C.; le recuit subséquent étant porté à 550° C., comme suit :

	<i>Température de trempe</i>	
	850° C.	1000° C.
Limite d'électricité, accroissement . . . . .	47 %	48 %
Limite de déformation permanente, accroissement . . . . .	22 »	62 »
Charge de rupture, accroissement . . . . .	9 »	24 »
Allongement, accroissement . . . . .	18 »	32 »

De ce dernier exemple, il résulte que la température de trempe de 1,000° C. est positivement la plus avantageuse, mais on doit se rappeler que dans le cas d'une matière d'une si faible teneur en carbone (0.09 %), les altérations dues à la trempe n'ont qu'un caractère purement physique.

### 3. — Trempe dans l'huile à + 80° C.

L'usage de l'huile comme liquide trempant au lieu de l'eau a produit une trempe plus douce dans presque chaque cas de cette série d'expériences. Ce fait avait déjà été reconnu précédemment, mais, à

un point de vue au moins, ces résultats d'essais de trempe dans l'huile présentent un intérêt particulier, surtout en ce qui concerne les valeurs de la limite réelle d'élasticité.

Comme il a été ci-dessus mentionné, un décroissement de ces valeurs se produit à la suite de la trempe dans l'eau, soit à 750°, 850° ou 1,000° C., sans recuit subséquent, tandis qu'ici, au contraire, quand la trempe se fait dans l'huile, l'effet est inverse, c'est-à-dire que la limite d'élasticité est accrue. Il n'y a que quelques exceptions à cette règle dans les essais effectués, dans le groupe III, avec trempe à 850° C.

#### 4. — Trempe dans le plomb à 550° C.

Les résultats de cette trempe doivent en général être semblables à ceux obtenus par la trempe dans l'eau et le recuit subséquent jusque 550° C., mais la trempe dans le plomb est de beaucoup moins énergique. Parmi d'autres causes, ce fait est, sans nul doute, dû, dans une certaine limite, à ce que la température du bain augmente graduellement pendant le cours de l'opération, même si la masse de plomb est supérieure à 1,000 kilogrammes. Une autre cause probable réside dans la difficulté de régler soigneusement la température du plomb liquide.

#### 5. — Influence de la composition chimique.

a) *Influence du manganèse.* — C'est un fait bien connu que le manganèse est apte à augmenter la qualité durcissante de l'acier. Ce fait est mis en évidence par le résultat des deux essais d'aciers ci-après, dans lesquels les teneurs en manganèse diffèrent sensiblement, tandis que le reste de la composition est à peu près identique dans les deux cas.

No	ANALYSE					Numéro de dureté	
	CARBONE	SILICIUM	MANGANÈSE	SOUFRE	PHOSPHORE	Non trempé	Trempé
	‰	‰	‰	‰	‰		
1	0.65	0.27	0.49	0.011	0.028	255	460
2	0.66	0.33	0.18	0.010	0.028	228	327

Il en résulte que l'accroissement de dureté dû à la présence du plus haut pourcentage de manganèse est, en moyenne, dans la matière non trempée, de  $\frac{255 - 228}{0.49 - 0.18} \times \frac{1}{10} =$  environ 9 unités pour chaque 0.1 % de manganèse, tandis qu'après trempe, il monte à  $\frac{460 - 327}{0.49 - 0.18} \times \frac{1}{10} =$  environ 43 unités pour chaque 0.1 % de manganèse.

On déduit également des résultats des essais que les taux d'accroissement de la charge de rupture dus au manganèse sont, en cas de trempe :

Pour la trempe à 750° C. = 2.3 unités pour chaque 0.1 % de manganèse.				
Id. 850° C. = 3.0	id.	id.	id.	id.
Id. 1000° C. = 4.5	id.	id.	id.	id.

Dans le cas de matière non trempée, l'accroissement correspondant était d'environ 3 unités pour chaque 0.1 % de manganèse. On peut en tirer la conclusion que, dans le cas de matière trempée, un plus haut pourcentage de manganèse augmenterait la dureté sans produire d'accroissement correspondant dans la résistance à la tension. De plus, tout en accroissant ainsi la charge de rupture de 2.3 à 4.5 unités pour chaque 0.1 %, le manganèse réduisait la valeur de l'allongement au taux de 0.4 pour chaque 0.1 % de ce métal dans la matière non trempée et de 0.6 à 0.8 pour chaque 0.1 % dans la matière trempée.

Des premières expériences faites par Brinell, il paraîtrait que l'action du manganèse en occasionnant un accroissement de dureté dans l'acier quand il est recuit, se manifestait plus énergique dans les présents essais que dans les précédents.

b) *Influence du silicium.* — En calculant les valeurs moyennes d'allongement et de charge de rupture dans les éprouvettes non trempées, on a obtenu les résultats suivants :

1. Si=0.453, allongement = 30 %; charge de rupture = 45 k. 7 par mm. carré			
2. Si=0.014, id. = 31.6 %; id. = 41 k. 2 id.			

Evidemment cette différence n'est pas très notable quand on considère la grande différence dans les pourcentages en silicium. De l'ensemble des résultats obtenus, il est établi que ce constituant n'exerce aucune influence nuisible sur les résultats de la trempe, une première fois du moins.

c) *Influence du soufre.* — Les matières essayées formaient deux groupes. Dans l'un, les deux éprouvettes contenaient respectivement 0.45 de carbone avec 0.18 et 0.56 % de soufre, tandis que dans l'autre, avec une teneur en carbone de 0.33 %, le soufre entraînait pour 0.015 et 0.15 % dans les échantillons. Dans les deux matières sulfureuses, le pourcentage de manganèse est de 1.06 % dans l'un et de 0.94 % dans l'autre.

Comme fait remarquable, on peut signaler que, en dépit des 0.56 % de soufre de l'une d'elles, on n'a pas constaté qu'elle fût cassante à chaud, ce qui était dû à l'influence compensatrice du manganèse. Au contraire, la matière sulfureuse de l'autre groupe ( $S_i=0.15$ ) s'est montrée égale à la non-sulfureuse du même groupe ( $S_i=0.015$ ), tant à l'état trempé qu'à l'état non trempé. On ne doit pas perdre de vue que toutes les valeurs dont il est question dans ce mémoire se rapportent seulement à la direction du laminage; Brinell a montré qu'il existe une différence essentielle quant à la qualité dans la direction de laminage et dans la direction transversale; cette qualité était inférieure dans cette dernière.

Les valeurs suivantes (trempe à 850° C. avec recuit subséquent à 350° C.) peuvent être obtenues avec une matière sulfureuse contenant 0.15 % de cuivre :

Limite d'élasticité . . . . .	=	39.6 k.	par mm.carré.
Limite de déformation permanente . . . . .	=	59.3	id.
Charge de rupture . . . . .	=	153.3	id.
Allongement . . . . .	=	4.3	%

Dans ce cas aussi, on n'a pas constaté que la matière fût cassante à chaud.

---

## II

*Influence de la composition chimique et des divers modes de traitement sur la résistance au choc dans le fer et l'acier à la température ordinaire et aussi à de basses températures.*

L'auteur a signalé déjà dans un autre mémoire que les valeurs obtenues par les essais de tension ne sont nullement un *criterium* certain en ce qui concerne les propriétés de résistance au choc d'une matière aciéreuse et que de semblables essais ont été abandonnés en

conséquence dans une certaine mesure. Mais, avant de considérer cet abandon comme justifié, il est désirable de procéder à une investigation complète.

Dans ce but, Brinell s'est proposé, tout en effectuant les essais de tension ci-dessus décrits, d'entreprendre une série d'essais au choc avec les mêmes matières. Il a également décidé de faire ces expériences, non seulement à une température d'environ 12° C. au dessus de la température normale, soit +30° C., mais aussi à la température exceptionnellement basse de -24° C. à -28° C. Il y a, en plus, deux essais effectués dans chaque cas, l'une avec une éprouvette entaillée et l'autre avec une éprouvette à section pleine. Comme on le sait, toute la question de la conduite du fer et de l'acier à de très basses températures ne peut être considérée comme résolue d'une manière satisfaisante. Bien qu'un grand nombre d'essais aient été effectués, spécialement dans le cas d'installations de chemins de fer, les résultats obtenus ont toujours été trouvés quelque peu irréguliers et même contradictoires.

Dans les contrées septentrionales, une semblable question ne devait pas manquer d'exciter un plus vif intérêt que dans celles où le climat est moins rude. En Suède, où il existe maintenant un réseau de chemins de fer s'étendant au-delà du cercle arctique, le sujet est d'importance capitale et les recherches entreprises par Brinell sont donc d'une valeur pratique essentielle.

Comme il a été mentionné ci-dessus, son programme comprend une série complète d'essais avec des spécimens qui sont entaillés dans le but de déterminer l'effet produit par des défauts dans la matière.

Bien qu'il ne soit pas possible de déterminer avec certitude absolue dans quelle mesure le défaut subit d'une matière, d'ailleurs parfaite, peut être directement ou indirectement dû à une telle cause, il est cependant certain que de telles circonstances se présentent plus fréquemment qu'on ne le suppose, particulièrement dans le cas de matières sujettes à des chocs. La rencontre d'un défaut local dans quelque partie d'une matière peut, dans un grand nombre de cas, être due à un manque de soins dans la fabrication ou à quelque défaut d'exécution; mais on rencontre très souvent des indications de défauts qui ne peuvent être attribués à l'une ou l'autre des causes précitées. En tout cas, la question est de trop grande importance pour être perdue de vue, et tous essais effectués pour déterminer la résistance aux chocs, caractéristique des diverses matières, méritent d'être rapportés.

**A. — Programme des essais.**

Dans chaque cas, la matière était soumise à plusieurs épreuves différentes, avec des barres pleines et avec d'autres entaillées. La température des barres essayées était  $+30^{\circ}$  C. et  $-20$  à  $-30^{\circ}$  C. Ces différents essais étaient entrepris avec des éprouvettes qui avaient subi les divers modes de traitement mentionnés ci-dessous, et à chacun desquels chaque espèce de matière était soumise :

1. Laminage à chaud, sans traitement ultérieur ;
2. Recuit, avec refroidissement lent subséquent ;
  - a) à  $350^{\circ}$  C.
  - b) à  $650^{\circ}$  C.
  - c) à  $750^{\circ}$  C.
  - d) à  $850^{\circ}$  C.
  - e) à  $1000^{\circ}$  C.
  - f) à  $1200^{\circ}$  C.
3. Recuit à  $850^{\circ}$  avec trempe subséquente :
  - a) dans le plomb à  $550^{\circ}$  C., sans nouveau recuit.
  - b) dans l'huile à  $+80^{\circ}$  C. et nouveau recuit subséquent à  $550^{\circ}$  C.
  - c) dans de l'eau à  $+20^{\circ}$  C.                   »                   »                     $550^{\circ}$  C.

Le nombre des matières était de 15, celui des traitements, de 10, et 4 essais étaient effectués avec chaque matière traitée. Le nombre des résultats d'essais obtenus s'élève conséquemment à  $15 \times 10 \times 4 = 600$  ; mais le nombre d'essais simples effectués dans le cours de ces expériences est supérieur de beaucoup, parce que les éprouvettes respectives permettaient de faire trois essais simples en cas de nécessité.

**B. — Matières soumises aux essais.**

Les mêmes qualités de matières étaient employées pour ces expériences que pour les essais de tension, plus deux autres.

On fit des lingots de 8 pouces qui furent laminés en blooms de 5 1/2 pouces ; ceux-ci furent laminés en une seule chaude en barres carrées de 30 <sup>m</sup>/<sub>m</sub> de côté, qui furent abandonnées au refroidissement à l'air libre.

Les entailles étaient pratiquées à une profondeur de 6 <sup>m</sup>/<sub>m</sub>, avec une largeur de 1 <sup>m</sup>/<sub>m</sub>, et sur les côtés opposés de la même section de la barre. Une scie, d'un modèle spécial, qui avait été aiguisée de la façon la plus soignée, était employée pour pratiquer les entailles, et une sonnerie électrique était pourvue d'un dispositif pour déclancher exactement à la profondeur requise. Toutes les barres d'essais étaient

préparées de la même manière, étant semblablement pourvues d'entailles, bien qu'on eût l'intention d'essayer une moitié des éprouvettes sans aucune incision.

Pour effectuer les essais normaux, il fut décidé de tourner les barres rondes de manière à avoir les entailles soit dans une position verticale soit parallèles à la direction de l'effort. Au moyen de cet arrangement, le point auquel la rupture devait se produire était connu d'avance et l'on obtenait toujours la même surface de cassure, mais il faut remarquer que l'allongement total devait en même temps ne se produire que dans une longueur de 1 <sup>mm</sup>, ceci étant la largeur des incisions latérales. Il devenait ainsi moins considérable que dans des cas semblables sans une telle incision. Par suite de cet inconvénient, le mode d'essai employé ici sans entailles ne devait donner comparativement que des résultats défavorables.

Quant à la forme des incisions, il doit être mentionné qu'elles étaient rectangulaires avec des bords plutôt aigus, circonstance qui ne doit pas être perdue de vue quand on compare finalement ces résultats avec ceux obtenus dans des occasions antérieures.

### C. — Recuit, trempe et autres particularités de traitement préliminaire.

Le procédé de recuit et de trempe était exactement le même que celui déjà décrit dans les essais de tension avec les mêmes matières.

Brinell a imaginé un appareil destiné à amener les éprouvettes aux températures voulues et précédemment indiquées; nous ne le décrivons pas.

L'appareil d'expériences est disposé de manière que les éprouvettes soient fixées à une extrémité seulement. Cette méthode, employée par Barba et d'autres, est essentiellement différente de celle généralement employée pour effectuer les essais aux chocs et dans laquelle les coups sont appliqués à l'éprouvette en un point situé à mi-distance entre les deux supports sur lesquels la barre est simplement posée sans être fixée en aucune façon.

Dans le nouveau système, la barre doit être solidement fixée à l'enclume; le poids de celle-ci doit être au moins dix fois celui du marteau. Dans le marteau employé par Brinell pour effectuer la présente série d'essais au choc, ce rapport était beaucoup dépassé, la proportion dans ce cas étant de 25 à 1.

Le poids du marteau était une constante de 18 kilogrammes. La



façon de procéder était la suivante : Après avoir été conservée dans la boîte en tôle de fer de l'appareil refroidisseur, aussi longtemps que de besoin, pour l'amener à la température voulue, la barre d'essai était promptement extraite et assurée sur l'enclume et l'essai était immédiatement exécuté. La hauteur de chute du premier coup était de 100 m/m, du second 200 et du troisième 300 et ainsi de suite ; au vingt-cinquième coup, la hauteur de chute avait ainsi graduellement augmenté jusque 2,500 m/m, le travail total effectué étant de 585 kilogrammètres.

#### D. — Résultats d'essais.

Quand on compare différents exemples d'essais, les valeurs numériques du travail effectué, exprimé en kilogrammètres, ne représentent nullement les valeurs comparatives exactes du choc supporté. Par exemple, quand deux barres éprouvettes sont rapportées comme ayant été brisées sous des efforts respectivement de 200 et de 100 kilogrammètres, le premier a effectivement supporté un effort plus que double de celui subi par le dernier. Sous ce rapport, l'appréciation exacte des valeurs est rendue difficile, parce que la véritable différence quant à la qualité devient moins marquée que si l'effet de chaque coup successif avait toujours été égal à celui du premier. Néanmoins, avec la diversité des matières essayées employées, cette méthode de Brinell est pratiquement la plus convenable puisqu'elle évite le nombre excessif de coups qui seraient nécessaires autrement, dans le cas de propriétés supérieures de résistance du métal.

Si l'on résume les résultats obtenus dans le but de les comparer plus facilement, la valeur du travail effectué dans chaque cas, semble offrir une base plus convenable de comparaison que le nombre de coups requis dans le cas de chaque essai, parce que, dans le premier, toute différence, quant à la qualité, est plus fortement marquée. Les résumés établis à l'occasion de l'Exposition de Paris étaient basés sur le principe mentionné en dernier lieu ; mais, pour la susdite raison, l'autre a été ici préféré. On doit néanmoins se rappeler toujours que les valeurs numériques du travail effectué ne permettent pas de faire une estimation exacte des différences actuelles en qualité, mais peuvent seulement être employées comme un moyen de classer les matières respectives ou les spécimens respectifs d'une même matière dans l'ordre de leurs valeurs relatives quant à la qualité. Néanmoins, quoique seulement approximatives, elles offrent un

moyen de déterminer avec une exactitude suffisante les valeurs relatives des différentes matières, sous le rapport de la résistance aux chocs.

1. — *Influence de la composition chimique.*

a) *Carbone.* — En ne tenant pas compte des charges sulfureuses 5 et 7, le tableau ci-annexé montre que la résistance aux chocs est beaucoup diminuée avec les taux croissants de carbone. Ceci est la règle générale, que la matière soit trempée ou non, essayée avec ou sans entailles, à haute ou à basse température. Il y a néanmoins, quelques irrégularités exceptionnelles à signaler dans le cas d'essais avec entailles à une température de gelée; par exemple, la matière non trempée, contenant 0.9 % de carbone, est inférieure à toute autre qualité d'acier essayé. D'ailleurs, d'une façon générale, la même règle domine aussi dans les essais à froid.

Valeurs moyennes de résistance au choc en kilogrammètres sur des éprouvettes isolées.

No d'ordre	COMPOSITION CHIMIQUE					ESSAIS AVEC <i>des éprouvettes normales</i>						ESSAIS AVEC <i>des éprouvettes entaillées</i>						VALEUR MOYENNE GÉNÉRALE		
	Carbone	Silicium	Manganèse	Soufre	Phosphore	+ 30° C.			-24° à -28° C.			+ 30° C.			-24° à -28° C.			Non trempé	Trempe	Valeur moyenne
						Non trempé	Trempe	Valeur moyenne	Non trempé	Trempe	Valeur moyenne	Non trempé	Trempe	Valeur moyenne	Non trempé	Trempe	Valeur moyenne			
1	0.09	0.005	0.10	0.020	0.026	403	504	454	141	226	184	111	246	179	2.3	17	10	164	248	206
2	0.18	0.014	0.38	0.015	0.029	302	484	393	144	473	309	74	275	175	5.4	104	55	131	334	233
3	0.16	0.453	0.26	0.010	0.030	375	334	355	201	199	200	94	100	97	37	56	47	177	172	175
4	0.25	0.299	0.41	0.012	0.029	209	290	250	123	229	176	49	76	63	26	55	41	102	163	133
5	0.31	0.126	0.94	0.150	0.033	379	452	462	345	482	414	288	493	391	58	96	77	268	403	336
6	0.34	0.266	0.49	0.015	0.026	161	191	176	111	217	164	44	55	50	23	47	35	85	128	107
7	0.46	0.369	1.06	0.560	0.055	140	203	172	149	190	170	92	71	82	43	72	58	106	134	120
8	0.44	0.275	0.46	0.018	0.029	105	218	162	93	164	129	22	47	35	13	27	20	58	114	86
9	0.49	0.238	1.25	0.010	0.027	98	265	182	57	261	159	22	62	42	12	69	41	47	164	106
10	0.65	0.275	0.49	0.011	0.028	55	199	127	34	116	75	14	24	19	8	7	8	28	67	48
11	0.64	0.336	0.18	0.010	0.032	56	145	101	40	176	108	14	31	23	6	35	21	29	97	63
12	0.79	0.378	0.20	0.011	0.029	44	157	101	47	166	107	15	40	28	9	31	20	29	99	64
13	0.94	0.289	0.25	0.013	0.025	49	117	83	49	164	107	14	24	19	9	25	17	30	83	57
14	1.05	0.308	0.20	0.009	0.031	30	79	55	25	60	43	8	19	19	7	9	8	18	42	30
15	1.17	0.313	0.21	0.010	0.027	30	77	54	22	76	49	7	16	12	5	12	9	16	45	31
Valeurs moyennes . . . . .						162	254	208	105	213	159	58	105	82	18	44	31			

b) *Silicium*. — Dans le but de déterminer l'influence du silicium, il n'y a que deux charges à considérer, les nos 2 et 3.

A l'état non trempé, la supériorité de la matière qui est la plus riche en silicium est incontestable. La chose est plus spécialement évidente dans le cas d'essais avec des éprouvettes entaillées et la différence est même plus marquée à la température de gelée. La valeur moyenne de l'effort total au choc est ici de 37 kilogrammètres pour cette matière, tandis qu'elle n'est que de 5.4 kilogrammètres pour l'autre.

En essayant les mêmes matières après trempe, le résultat est complètement différent, la première est alors essentiellement inférieure à la moins siliciée. Mais on ne doit pas oublier que le plus bas pourcentage de silicium est ici combiné avec un pourcentage supérieur de carbone et aussi de manganèse, par suite desquels cette matière a probablement pris une trempe supérieure, et, par rapport à la propriété de résistance au choc, chaque matière semble être améliorée par la trempe.

Les résultats contradictoires ainsi obtenus dans le cas d'échantillons trempés ou non, semblent n'admettre aucune conclusion générale quant à l'influence du silicium. Selon les essais de tension décrits ci-dessus, le plus haut pourcentage de silicium a été trouvé, en moyenne, être accompagné d'une augmentation de résistance et d'élasticité et d'une diminution de ductilité, bien que l'existence de plusieurs irrégularités fût vérifiée, avec la matière trempée comme avec celle non trempée. Néanmoins, la matière plus riche en silicium était, quand elle était essayée dans l'état original, sans trempe ni recuit, supérieure, sous tous rapports, à l'autre.

c) *Manganèse*. — Des résultats obtenus dans le cas des deux charges : le n° 8 dans laquelle le manganèse est de 0.46 % (ce qui est à peu près normal) et le n° 9 ayant une teneur exceptionnellement élevée en manganèse, on peut conclure :

Que, dans les éprouvettes trempées, normalement essayées, la résistance aux chocs est considérablement augmentée par suite du manganèse, tandis que, dans les éprouvettes non trempées, on constatait des phénomènes absolument opposés ;

Que les essais des éprouvettes entaillées sans trempe ont donné à peu près les mêmes résultats, tandis que dans celles qui ont subi la trempe, on constate que le manganèse améliore la matière.

L'effet bienfaisant du manganèse dans le cas de matière trempée est probablement dû à l'énergie spéciale de la trempe qui est caractéristique pour ce constituant, ainsi qu'il a été constaté antérieurement

à plusieurs reprises. Néanmoins, la matière trempée n'est pas employée dans le cas où la qualité de résistance aux chocs est en pratique mise à l'essai et, sous ce rapport, de plus haut pourcentages en manganèse devraient être évités dans de semblables cas.

La conclusion ci-dessus est confirmée par les résultats obtenus dans le cas des deux charges 10 et 11, la première à la teneur à peu près normale en manganèse de 0.40 % et l'autre à très faible teneur en manganèse, 0.18 %. La première de ces deux matières, bien que trouvée supérieure, quand elle est trempée et normalement essayée à +30° C., est essentiellement inférieure dans tout autre cas. Ceci est plus remarquable lorsque les pourcentages de phosphore et de silicium excèdent quelque peu ceux rencontrés dans les matières plus pauvres en manganèse; que si les résultats obtenus après trempe ne se montrent pas identiques avec ceux de la précédente série (8 et 9), le fait est probablement dû à ce que le pourcentage de manganèse du n° 10, bien que deux fois aussi élevé que celui du n° 11, ne suffit pas seul à produire un accroissement sensible dans la capacité durcissante de la matière.

d) *Soufre*. — Parmi les différents résultats de la présente série d'essais, les plus remarquables sans conteste sont ceux relatifs à l'influence du soufre.

Les deux matières considérées ici ont une teneur exceptionnellement élevée en soufre, les charges n° 7 et 5, en contenant respectivement 0.56 % et 0.15 %. La première n'est intéressante qu'à un point de vue purement théorique; il suffit de dire ici que les valeurs d'essais sont au moins égales à celles obtenues dans le cas des deux charges non sulfureuses contenant à peu près le même pourcentage en carbone (n°s 8 et 9).

Le cas de l'autre charge sulfureuse (n° 5) est complètement différent. Quoique le pourcentage de soufre dépasse de beaucoup la limite ordinaire, l'adoption de cette nature d'acier pour les usages pratiques n'est nullement exclue, pourvu que les propriétés physiques soient acceptables. Les propriétés de tension de cette matière sont, comme il a été dit, tout à fait satisfaisantes dans le sens du laminage, et les propriétés de trempe sont irréprochables. Des résultats obtenus, il s'ensuit de plus que cette matière est supérieure, en ce qui concerne la résistance aux chocs, à toute autre dans la présente série. Cela a été le cas dans toutes les espèces d'essais, soit à l'état trempé ou non trempé, à une basse ou à une haute température, que les éprouvettes fussent entaillées ou normales. La seule exception à cette règle a été

constatée dans le cas d'un métal à très faible teneur en carbone, n° 1, (C = 0.09 %), qui a été trouvé quelque peu supérieur dans un des essais, c'est-à-dire quand il a été essayé à l'état non trempé à +30°C.

Il est à présumer que cette supériorité évidente de la matière sulfureuse est uniquement due au haut pourcentage de manganèse en combinaison en même temps que le soufre. Il se produit probablement une formation de sulfure de manganèse pendant le raffinage, matière qui se disperse comme une scorie dans les métaux quand ils sont forgés ; de cette façon, elle forme une espèce de réseau à travers toute la masse et produit une augmentation très considérable dans la résistance aux chocs.

## 2. — *Influence des températures de gelée.*

Comme il a été signalé précédemment, les résultats des premières recherches quant à la conduite du fer et de l'acier aux basses températures ont montré quelques variations. Cela est dû, sans conteste, à ce que, dans certains cas, les essais ont été exécutés d'une manière plus ou moins inappropriée. Des différences, par exemple, peuvent être notées dans les résultats obtenus au moyen des essais aux chocs sur la même matière, quand les essais sont effectués en plein air, ou en différentes saisons, en été ou en hiver. Dans le dernier cas, l'état du sol, qui peut être gelé plus ou moins fort, doit être pris en considération comme une cause probable de chocs plus effectifs. L'auteur a eu l'occasion d'expérimenter personnellement ce fait dans un cas d'essai de bandages, une partie du lot étant essayée en été et l'autre à la fin de l'année, quand la température à l'air libre était d'environ -15° C. Dans la dernière réception, la matière était chauffée à environ +38° C., mais les résultats furent néanmoins incomparablement inférieurs à ceux obtenus lors de la première réception.

En procédant aux essais nouveaux, Brinell a pris toutes les précautions contre des influences de cette espèce. Tous les essais furent effectués à l'intérieur et à la même température de l'air. La seule circonstance qui puisse avoir donné lieu à des irrégularités, semble être que, pour une raison ou l'autre, la manutention des éprouvettes, quand elles étaient prises de l'appareil refroidisseur et fixées sur l'appareil à essayer, a quelque fois pris plus de temps qu'il n'est généralement nécessaire pour cette opération. La température d'essai de ces éprouvettes devait varier si on la comparait à celle

des autres et la variation de température durant l'essai devait différer aussi selon le nombre de coups appliqués et le temps requis dans les différents cas. Cela était difficile à éviter, mais considérant que l'air est un mauvais conducteur de la chaleur et que les variations de température n'étaient jamais très considérables, il est difficile de supposer que les résultats d'essais aient été influencés à un degré appréciable par cette cause. Quant à l'influence des températures de gelée sur la résistance aux chocs dans le fer et l'acier, on peut déduire ce qui suit des résultats de la présente série d'essais :

Que d'après les valeurs données dans le tableau précédent, la valeur moyenne générale du travail accompli dans tous les essais à  $+ 30^{\circ}$  C. est de 145 kilogrammètres, tandis que dans les essais à de  $- 24^{\circ}$  à  $- 28^{\circ}$  C, le travail fait ne représente que 95 kilogrammètres. La résistance aux chocs est ainsi, dans le dernier cas, inférieure d'au moins 34 %;

Que l'infériorité dont il s'agit est, en grande partie, due à la présence d'entailles. Selon le tableau précité, le rapport des résistances moyennes totales aux chocs, respectivement aux hautes et aux basses

températures, est de  $\frac{208 \text{ kgm.}}{159 \text{ kgm.}}$  dans le cas des essais normaux,

tandis qu'il s'élève à  $\frac{82 \text{ kgm.}}{31 \text{ kgm.}}$  dans les essais avec des éprouvettes

entaillées, ou respectivement 24 et 62 %. On peut en conclure que l'influence des basses températures est essentiellement plus nuisible à la matière ainsi prédisposée;

Que l'influence nuisible des basses températures est plus ou moins énergique selon que le pourcentage en carbone décroît ou croît. En comparant les deux charges, le n° 1 (la plus douce) et le n° 15 (la plus dure), on trouve que pour la première, le travail moyen effectué dans les essais normaux est de 454 kilogrammètres à  $+ 30^{\circ}$  C., contre 184 kilogrammètres à la température de gelée, ou un décroissement de 60 %, tandis que, dans la matière la plus dure, on ne note qu'un décroissement de 9 %. Les résultats moyens correspondants sont ici de 54 et de 49 kilogrammètres respectivement. D'après les valeurs moyennes correspondantes des essais avec des échantillons entaillés, le même fait apparaît encore plus marqué; puisque l'on constate des taux de décroissement qui ne sont pas inférieurs à 94 % (179 kilogrammètres à 10 kilogrammètres) dans le même acier à faible teneur en carbone, contre 25 % (12 kilogrammètres à 9 kilogrammètres), dans le plus dur.

La même règle paraît se maintenir, bien qu'à un degré non aussi prononcé, à travers toute la série de pourcentages en carbone, excepté dans la charge sulfureuse n° 5 (carbone = 31 %; soufre = 0.15 %);

Qu'un accroissement du pourcentage en silicium semble rendre un acier trempé, quand il est normal, plus fragile aux basses températures (voir n° 2 et 3). Un acier non trempé essayé normalement ou avec des entailles, est, au contraire, influencé en sens opposé, tandis que l'influence du manganèse, à en juger par les deux charges, n° 8 et 9, semble aussi en général être favorable sous ce rapport;

Que le soufre, quand il est combiné avec une quantité suffisante de manganèse, neutralise essentiellement l'influence nuisible des basses températures;

Qu'en comparant les résultats d'essais obtenus avec la matière trempée et non trempée, l'influence nuisible des basses températures est de beaucoup plus énergique dans la première que dans la dernière; la différence est très importante. Bien que plusieurs essais avec des matières trempées — à l'état normal ou avec des entailles, comme dans le cas du n° 9 — aient donné approximativement des résultats égaux aux hautes et aux basses températures, et d'autres, comme dans le cas des n° 11, 12 et 13, aient même montré des valeurs améliorées aux basses températures, on trouve cependant que les valeurs des essais de la matière non trempée, de  $-24^{\circ}$  à  $-28^{\circ}$  C. ont, sans exception, été trouvées considérablement inférieures à celles obtenues à  $+30^{\circ}$  C. Cette supériorité de la matière trempée est sans doute due au fait que la structure de la matière est essentiellement améliorée par la trempe.

### 3. — *Influence des entailles dans les éprouvettes.*

Des résultats résumés dans le précédent tableau, on conclut :

Qu'indépendamment des différences dans la composition chimique, des modes de traitements préalables ou de températures d'essais, la valeur moyenne de la résistance totale aux chocs est de 184 kilogrammètres dans les échantillons normaux, et n'est que de 57 kilogrammètres dans les essais avec des échantillons entaillés; le décroissement de résistance aux chocs dû à l'influence des entailles est ainsi de 69 %;

Qu'ainsi qu'il a déjà été signalé, la température exerce ici une très grande influence sur la résistance. A  $+30^{\circ}$  C., la réduction de résistance due à l'entaille était de 61 %, tandis que de  $-24^{\circ}$  à  $-28^{\circ}$  C., elle était de 80 %;



Que l'influence de l'entaille paraît ne pas être affectée par le pourcentage de carbone, puisque, en examinant les valeurs du tableau, les variations ne sont soumises à aucune règle fixe ;

Que, pour autant qu'on peut en juger par les deux charges nos 2 et 3, le silicium semble rendre l'influence des entailles plus nuisible dans la matière trempée et moins dans la matière non trempée ;

Que l'effet du manganèse est complètement neutre sous ce rapport ;

Que le soufre, quand il est combiné avec une quantité suffisante de manganèse, neutralise dans une forte proportion, les effets des entailles ;

Que l'influence des entailles est de beaucoup moins effective dans l'acier trempé que dans l'acier non trempé.

#### 4. — Influence des différents modes de traitement préalable.

Des essais de tension effectués avec les mêmes matières que celles qui ont été décrites ci-dessus, il résulte que, régulièrement, la qualité des matières est améliorée par le recuit et le refroidissement subséquent en plein air. Même quand on chauffe seulement la matière jusque 350° C., une amélioration marquée est observée, et elle est générale par rapport à la tenacité, l'élasticité et la résistance. Il aurait été raisonnable de supposer que, dans la présente série d'essais, le même traitement aurait fourni des résultats analogues, mais cette supposition n'était pas établie par des faits.

Dans le but de faciliter l'étude comparative de l'influence des différents modes de recuit et de trempé, un tableau a été dressé, qui donne les résultats moyens des résistances totales aux chocs, en kilogrammètres, obtenus dans chacun des groupes en lesquels les diverses matières ont été divisées, quant au pourcentage du carbone :

Groupe I, nos 15, 14, 13, 12, 11 et 10 : teneur moyenne en carbone	= 0.87 %
» II, nos 9 et 8	= 0.47 »
» III, nos 6 et 4	= 0.30 »
» IV, nos 3 et 2	= 0.17 »
» V, no 1	= 0.09 »
» VI, nos 7 et 5	} carbone . . . . . = 0.39 » soufre . . . . . = 0.36 »

a) *Recuit et refroidissement lent.* — GROUPE I. — Teneur moyenne en carbone = 0.87 %. — Quand elle est essayée à des températures en dessous de 750° C., la matière devient plus fragile.

Seulement quand le recuit est poussé à 850° C. et au-delà, il semble produire une amélioration.

GRUPE II. — Teneur moyenne en carbone = 0.47 %. — La résistance aux chocs dans ce cas est toujours réduite, excepté en réchauffant à 850° C. Autrement, si la matière n'est chauffée qu'à 350° C. ou recuite jusque 1200° C., l'effet est nuisible.

GRUPE III. — Teneur moyenne en carbone = 0.30 %. — Le recuit à toute température au-dessous de 1000° C. doit être évité. En recuisant jusque ou au-delà de cette température, la qualité semble être améliorée.

GRUPE IV. — Teneur moyenne en carbone = 0.17 %, et

GRUPE V. — Teneur moyenne en carbone = 0.09 %. — Ils suivent la même règle que le groupe III.

GRUPE VI. — Teneur moyenne en carbone = 0.39 % et en soufre = 0.36 %. — Au moyen du réchauffage et du recuit à l'une ou l'autre température respectivement mentionnée dans le tableau, la qualité est sensiblement améliorée.

Pour autant que les chiffres obtenus permettent de le dire, les résultats ci-dessus persistent indépendamment de toute différence dans la température des essais, que ceux-ci s'effectuent sur les éprouvettes normales ou entaillées, en d'autres termes, indépendamment des différents modes d'essais indiqués dans le programme de la présente série.

*b) Trempe dans le plomb, l'huile et l'eau.* — Préalablement à la trempe, soit au plomb, à l'huile ou à l'eau, les éprouvettes étaient, sans exception, recuites jusque 850° C.; la température des liquides trempants était respectivement de + 550°, + 80° et + 20° C. Quand les éprouvettes étaient trempées dans l'huile ou dans l'eau, elles étaient ensuite soumises à un nouveau recuit jusque 550° C.

Le recuit se montre toujours effectif en augmentant la résistance aux chocs, tandis que, sous le rapport de l'efficacité des milieux trempants respectifs, la trempe au plomb a été trouvée relativement non effective, avec l'huile, plus effective et, avec l'eau, de beaucoup la plus effective.

---

Ce mémoire n'a donné lieu, faute de temps, à aucune discussion au Congrès.

---