

N° 5

THÈSES

PRÉSENTÉES

à la Faculté des Sciences de l'Université de Lille

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES D'UNIVERSITÉ

PAR

M. DELBART GEORGES

Ingénieur I. C. L.

Chef de Laboratoire à la Société Anonyme d'Escout et Meuse

1^{re} THÈSE

Contribution à l'étude des Aciers étirés à froid

Étude comparée de la Corrosion des Fontes

2^{me} THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenue le 16 Avril 1926, devant la Commission ~~de l'Université~~

M. SWYNGHEDAUX, *Président*

MM. PASCAL

JOUNIAUX

} *Examinateurs*

IMPRIMERIE G. SAUTAI
46, Rue Gauthier-de-Châtillon, 46

LILLE

**Contribution à l'étude des Aciers
étirés à froid**

Étude comparée de la Corrosion des Fontes

N° 5

THÈSES

PRÉSENTÉES

à la Faculté des Sciences de l'Université de Lille

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES D'UNIVERSITÉ

PAR

M. DELBART GEORGES

Ingénieur I. C. L.

Chef de Laboratoire à la Société Anonyme d'Escaut et Meuse

1^{re} THÈSE

Contribution à l'étude des Aciers étirés à froid

Étude comparée de la Corrosion des Fontes

2^{me} THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenue le 16 Avril 1926, devant la Commission d'Examens

M. SWYNGHEDAUX, *Président*

MM. PASCAL

JOURNIAUX

} *Examineurs*

IMPRIMERIE G. SAUTAI

46, Rue Gauthier-de-Châtillon, 46

LILLE

Tous droits réservés

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

Botanique	MM. MAIGE, Doyen.
Zoologie Générale et appliquée	MALAQUN, Assesseur. DAMIEN, Doyen Honoraire.

Professeurs Honoraires

MM. HALLEZ, DAMIEN, RICOME, PETOT, CHATELET.

Professeurs

Géologie et Minéralogie	MM. BARBOIS
Physique et Electricité Industrielle	SWYNGHEDAUX.
Mathématiques	GAMBIER.
Chimie Générale	PÉLABON.
Chimie appliquée	PASCAL.
Calcul différentiel et intégral	CHAZY.
Botanique appliquée	BERTRAND.
Chimie organique	FOSSE.
Physique	BRUHAT.
Géologie appliquée	PRUVOST.
Physique expérimentale et Radiotélégraphie ..	PAILLOT.
Chimie Physique	PARISELLE.
Mécanique rationnelle et appliquée	BÉGHIN.
Anatomie comparée et Biologie maritime ...	DEHORNE.

Professeurs sans chaire

Chimie appliquée	MM. JOURNAUX.
Mathématiques	CHAPELON.
Mathématiques	KAMPÉ DE FÉRIET.
Physique	PANTHENIER.
Hydrologie	MM. DOLLÉ, Maître de conférences BOURY, Secrétaire. GUILLET, LEBRUN, Secrétaires honoraires.

La Faculté a décidé que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'en entend y attacher aucune approbation ni improbation. (Décision de la Faculté en date du 23 février 1879.)

A MES PARENTS,
Expression de mon amour filial.

A Monsieur PASCAL.
Professeur à la Faculté des Sciences
de l'Université de Lille.
et à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures

Et à Monsieur DEFAYS
Directeur Général des Usines de la Société
Anonyme d'Escaut et Meuse.

RESPECTUEUX HOMMAGE

Contribution à l'étude des Aciers Étirés à froid



Etude comparée de la corrosion des fontes

INTRODUCTION

Les nombreuses études déjà faites sur l'érouissage des aciers, sur l'étirage et le tréfilage prouvent l'importance du sujet, et on est loin encore d'avoir exploré tout le champ d'étude que nous offre cette question.

Nous avons eu l'heureuse occasion de faire à la fois des études de laboratoire et des essais d'usine, et nous avons pensé pouvoir apporter notre modeste collaboration à l'étude de l'étirage à froid avec filière et mandrin.

Nous nous sommes placés ici à un point de vue tout particulier en essayant de nous tenir dans des conditions de travail aussi voisines que possible de la pratique industrielle de l'étirage à froid. Or, dans la pratique, les recuits sont aussi rapides que possible en vue, d'une part, d'augmenter le rendement, et d'autre part, d'éviter une oxydation trop prononcée de la surface des objets, qui ensuite, doivent être décapés. En outre, il arrive souvent qu'un même métal subisse un grand nombre de passages à la filière avec recuits intermédiaires à températures assez basses. Nous nous sommes attaché à l'étude de l'influence du recuit final sur des aciers traités de cette façon et nous avons successivement travaillé sur les points suivants :

Résistance, Allongement, Dureté, Corrosion et Fragilité.

Après quoi, nous avons comparé les aciers à un grand nombre de fontes, au point de vue spécial de la

corrosion, car on emploie parfois concurremment dans l'industrie chimique des aciers et des fontes, en particulier dans les canalisations. De plus, nous avons produit la coalescence de la cémentite des fontes grises et étudié la corrosion des fontes ainsi transformées comparativement aux fontes naturelles.

Le but de notre étude a donc été de fournir aux industriels qui s'occupent de ces questions, des données dont ils pourront se servir et qui complètent les études importantes déjà faites, que nous allons passer en revue.

HISTORIQUE. — M. Paul GOERENS présentant en 1911 à l'*Iron and Steel, Institute*, un travail intitulé « *L'influence de l'écroutissage sur les propriétés de l'Acier* » dans lequel il faisait une étude très approfondie des aciers écrouis.

Peu de temps après, M. Léon GUILLET complétait l'étude de GOERENS en établissant des courbes de résistance, d'allongement et de limite élastique en fonction du recuit, dans un mémoire intitulé « *Recherches sur le recuit des produits écrouis* », paru dans la revue de Métallurgie de Mai 1913.

Voici quelques chiffres donnés par M. GUILLET à la page 667 de cette brochure.

FILS D'ACIER DE NUANCES DIVERSES

Température du recuit	Acier dur		Acier 1/2 dur		Acier doux	
	R.	A %	R.	A %	R.	A %
Brut	220,6	2	90,6	6,5	96,3	6
400	197,5	6	87,6	8,5	85,4	6
450	177	7	81,6	10	82,6	7
500	169,6	3,5	82,8	10,5	80,6	7
550	151,4	4,6	81,5	11	79,8	7
600	140,3	4	76,2	11	72,2	8,5
650	136,9	4	52,9	21	70,7	9,4
700	115,1	5	48,5	26	42,8	25,5
750	96,8	5,5	47,3	28	42,8	25,5
800	87,9	8	50,2	25	44,2	23,5
850	87,5	8	48,9	26	44,2	23
900	87,7	8	49,3	27	44,7	21

et Monsieur GUILLET concluait : « Ces résultats mettent en évidence que le recuit complet a lieu à 750°, 800° pour l'acier dur, à 700, 750° pour l'acier 1/2 dur et l'acier doux.

Les résultats donnés ci-dessus, indiquent une constance assez remarquable entre les différents chiffres obtenus pour tous les recuits aux températures supérieures à 700°, sauf pour l'acier dur.

Monsieur P. GOERENS faisait paraître à nouveau en 1914 un travail intitulé : « *Influence du recuit sur les propriétés de l'acier doux écroui* » (1). Il étudiait ici un fil d'acier doux ayant la composition suivante :

C	0,08
Si	0,008
S	0,056
P	0,059
Mn	0,39

Ce fil fut étiré en 5 passages à la filière de 7 mm. de diamètre à 2 mm. 7, ce qui fait une réduction de 85 %.

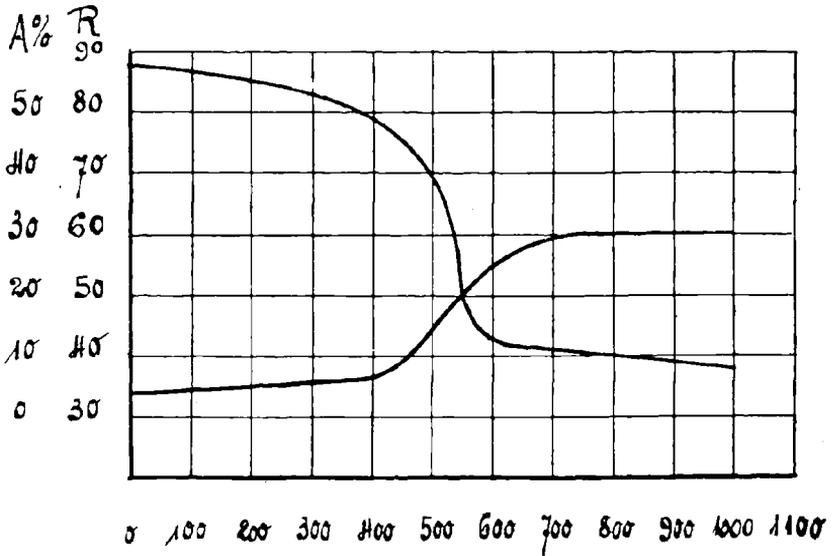
Des sections de ce fil furent recuites à différentes températures et maintenues 10 minutes à ces températures.

Les résultats obtenus pour la résistance et l'allongement sont les suivants :

Température du recuit	Résistance	Allongement
Brut	87	6,7
380	80,1	9,7
435	79,2	10
530	43,7	32,2
600	42	24,9
640	41,9	27,7
710	39,4	29,9
810	40	28,9
1070	39,8	29,6

(1) Stahl und Eisen, Février 1914.

Ces chiffres donnent des courbes ayant l'allure ci-dessous :



GOERENS conclut de ses essais :

- Qu'un acier doux écroui peut reprendre par recuit ses qualités primitives ;
- Qu'un recuit prolongé à température inférieure à 520° ne peut détruire l'écroutissage ;
- Qu'un recuit de quelques minutes au-dessus de 520° ramène l'acier à son état primitif.

Pour déterminer si cette température de 520° était valable pour toutes les qualités d'acier, il fit des essais sur différents métaux et trouva toujours une température située entre 520 et 580 .

Il poursuivit ensuite par l'étude de la corrosion dans l'acide à 1 % de $\text{SO}_4 \text{H}^2$. Les résultats obtenus sont les suivants :

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DE RECUIT
SUR LA VITESSE DE DISSOLUTION
DANS $\text{SO}^4 \text{H}^2$ à 1 %

Températures de recuit	Pertes de poids				en 120 h.
	1 ^{re} période de 24 h.	2 ^e période	3 ^e période	4 ^e période	
Brut	0,029	0,053	0,299	0,758	1.139
377	0,114	0,178	0,291	0,354	0,847
436	0,159	0,168	0,191	0,276	0,786
479	0,108	0,180	0,126	0,260	0,574
531	0,118	0,095	0,072	0,320	0,605
598	0,085	0,054	0,062	0,167	0,368
640	0,109	0,075	0,084	0,223	0,491
712	0,064	0,041	0,038	0,100	0,243
811	0,035	0,018	0,027	0,041	0,121
911	0,063	0,031	0,024	0,036	0,154
985	0,029	0,011	0,015	0,016	0,071
1050	0,028	0,020	0,015	0,023	0,086
1072	0,028	0,015	0,011	0,016	0,070

La corrosion diminue progressivement en fonction de la température de recuit, ceci est concordance avec les résultats des recherches de MM. OSMOND et WERTH qui ont montré que les aciers travaillés à froid étaient notablement plus solubles dans les acides étendus que les aciers non écrouis, mais le travail de M. GOERENS a le mérite de montrer de quelle façon varie la solubilité en fonction de la température de recuit.

Enfin, certains auteurs ont montré l'influence de l'écrouissage sur la coalescence de la perlite. WITHELEY (1) a trouvé que le recuit d'un acier écroui avait pour effet de provoquer la division rapide en sphéroïdes des lamelles de cémentite. D'après l'auteur, le changement commence à environ 500° (température indiquée par GOERENS, comme étant celle de la disparition de l'écrouissage) et se poursuit avec une rapidité

(1) Revue de Métallurgie de Nov. 1921. Mémoire de MM. Portevin et Bernard.

té croissante au fur et à mesure que la température s'élève ; à 680° la disparition de la perlite lamellaire peut être complète en moins de deux heures, même pour un acier entectoïde où les lamelles sont très minces. Il faut environ 4 heures de chauffage pour la perlite très grossière, alors que cette transformation demanderait 4 jours dans un acier non écroui. Si on part de troostite ou de sorbite, donc d'une finesse de cémentite plus grande, la durée du recuit nécessaire pour produire la coalescence est encore diminuée.

D'autre part, HANEMANN et LINDT ont étudié les modifications que les laminages à froid et recuits successifs produisent sur un ruban d'acier à 1,20 % de carbone et ils ont constaté que la résistance à la traction et à la corrosion dans l'acide sulfurique étendu diminuait.

Les auteurs précédents ont étudié la coalescence de la cémentite uniquement dans les aciers hypereutectoïdes ; d'un autre côté, MM. GOERENS et GUILLET ont établi des courbes de résistance et d'allongement en fonction de la température pour des aciers hypoeutectoïdes, mais en considérant uniquement le phénomène de l'écroutissage. Or, nous avons constaté dans la pratique de l'étirage à froid que l'on obtenait souvent sans le chercher un adoucissement des aciers hypoeutectoïdes qui sont les plus utilisés chez les étireurs de barres ou de tubes. Cet adoucissement provenait de la coalescence de la cémentite qui était provoquée facilement par les étirages et recuits successifs, tels qu'on les pratique dans l'industrie.

Sur les conseils de Monsieur PASCAL, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Lille et avec l'autorisation de Monsieur L. DEFAYS, Directeur Général de la Société Anonyme d'Escaut et Meuse à Anzin, nous avons entrepris, aux usines d'Anzin, de compléter les travaux des auteurs désignés ci-dessus en précisant l'action des étirages à froid et recuits successifs sur des aciers hypoeutectoïdes.

La résilience des aciers traités comme nous l'avons vu n'a pas, à notre connaissance, été étudiée.

POMP donne des courbes de résilience pour un acier doux écroui, recuit à des températures variant entre 0 et 500° et entre -- 20 et 100° (1). MAURER et MAILANDER étudient la fragilité au bleu de l'acier doux étiré et recuit (2).

Enfin, MM. CECIL, H. DESCH et AUBREY T. ROBERTS donnent dans un travail présenté à l'Iron and Steel Institute en Mai 1923, des chiffres de dureté et de résilience d'aciers coalescés comparés à ceux obtenus pour les mêmes aciers normalisés ; ils concluent à un influence défavorable de la coalescence sur la résilience.

Quant à l'étude de la corrosion des fontes, aucun travail traitant le sujet dans le même esprit que nous, n'est venu à notre connaissance.

Ce travail commencé en 1923 a été terminé en 1926 et les principaux résultats obtenus ont fait l'objet de diverses communications présentées à l'Académie des Sciences par M. Henry LE CHATELIER (3).

Il me reste, avant d'aborder le sujet, à remercier Messieurs PASCAL et DEFAYS pour leur bienveillance et pour les conseils qu'ils ont bien voulu me donner. Qu'il me soit permis de leur exprimer ici ma vive reconnaissance.

(1) Stahl und Eisen, 5 Mars 1925.

(2) Stahl und Eisen, 19 mars 1925.

(3) Comptes-rendus des 23 Mars, 22 Juin, 23 Novembre 1925 et Janvier 1926.

Etude de l'influence des étirages à froid et recuits successifs sur la résistance et l'allongement.⁽¹⁾

Les essais préliminaires ont été effectués sur des tubes d'acier doux et demi-durs ayant subi trois étirages à froid et des recuits intermédiaires entre les températures de 650 et 700° centigrades.

Leur composition chimique était la suivante :

1° *Acier doux* C=0,11 Si=0,056 S=0,053 P=0,010 Mn=0,45

2° *Acier $\frac{1}{2}$ dur* C=0,364 Si=0,187 S=0,025 P=0,025 Mn=0,72

Après le troisième passage à la filière, nous avons prélevé sur le métal écroui des éprouvettes ayant les dimensions suivantes : largeur moyenne = 30 $\frac{m}{m}$, épaisseur = 4 $\frac{m}{m}$. L'allongement était mesuré sur 100 $\frac{m}{m}$. Ces éprouvettes ont été recuites à la volée, c'est-à-dire, retirées du four sitôt la température atteinte, afin de nous placer exactement dans les conditions de la pratique industrielle ; les étireurs ayant généralement tendance à ne pas laisser séjourner leurs produits dans les fours afin d'éviter l'oxydation superficielle, qui est un inconvénient sérieux. L'oxydation superficielle nécessite en effet un décapage prolongé lequel doit être absolument complet si l'on veut éviter les raies d'étirage et maints petits accidents qui ont une grande importance dans la pratique.

Les tractions ont été effectuées avec une machine de 50 T à pression hydraulique, les températures de recuit ont été mesurées au couple LE CHATELIER : Platine, platine rhodié. Enfin le recuit a eu lieu dans un four à moufle Meker.

(1) C. R. du 23 Mars 1925, p. 934.

Voici les résultats obtenus à l'essai de traction :

1° ACIER DOUX

Températures de recuit	Résistance	Allongement	Températures de recuit	Résistance	Allongement
15°	62,5	5	600°	41,1	31
100°	60,4	7	650°	38,6	31
200°	61,4	11	700°	38,8	31
300°	60	12	750°	40,1	30
400°	54,6	13	800°	40	30,5
500°	47,9	18	850°	39,7	30
550°	44,3	19	900°	39,8	30

2° ACIER DEMI DUR

15°	86,7	5	600°	56	22
100°	85,6	4	650°	50	26
200°	80,5	8	700°	61	23
300°	75,4	11	750°	63,1	22
400°	74,4	10	800°	59,4	24
500°	69,4	13	850°	59,6	24
550°	63,4	18			

Il résulte de ces premiers résultats que l'on observe une chute de la résistance entre 600° et 700°, à laquelle correspond une augmentation de l'allongement. En outre on constate qu'à partir de 800° le métal retrouve les propriétés qu'il possédait avant étirage, à l'état brut de laminage.

En possession de ces premiers résultats, nous avons entrepris l'étude approfondie des aciers hypoeutectoïdes les plus utilisés dans l'industrie de l'étirage à froid. Nous avons employé pour cela un acier doux, deux aciers demi-durs, un acier dur.

Les étireurs ont évidemment avantage à utiliser des ébauches qui se rapprochent le plus possible des dimensions du produit fini. Ils peuvent ainsi réduire le nombre de passages à la filière et par suite diminuer la main d'œuvre, le nombre de décapages et de recuits. Nous nous sommes donc placé dans un cas extrême en faisant subir aux aciers désignés ci-dessus six passages à la filière avec réduction moyenne de 20

pour 100 et des recuits intermédiaires de 10 minutes entre 650 et 700°. En outre, on fit subir aux produits ainsi obtenus deux déformations en vue de pouvoir prélever des éprouvettes faciles à rectifier.

Voici les analyses chimiques de ces aciers :

Qualité N°	c	Si	S	P	Mn
Acier doux 1	0,127	0,06	0,033	0,019	0,44
Acier $\frac{1}{2}$ dur 2	0,40	0,199	0,017	0,014	0,66
Acier $\frac{1}{2}$ dur 3	0,356	0,186	0,020	0,015	0,61
Acier dur 4	0,60	0,119	0,017	0,020	0,64

Ces métaux sont d'excellents aciers MARTIN, fabriqués à la Société Anonyme d'Escaut et Meuse à Anzin.

La perlite de ces aciers écrouis, traités comme nous l'avons vu plus haut, était coalescée. On prélèvera des barrettes plates de 4 $\frac{m}{m}$ d'épaisseur et de 30 $\frac{m}{m}$ de large. L'allongement était pris comme précédemment sur 100 $\frac{m}{m}$ de longueur.

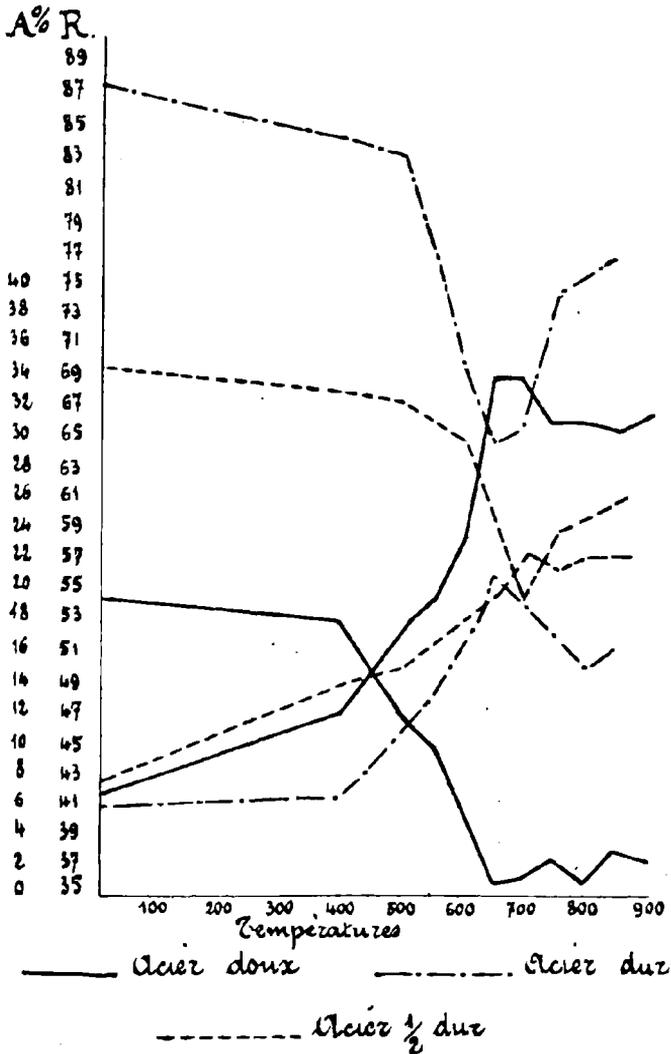
Voici les résultats que nous avons obtenus avec ces éprouvettes maintenues 10 minutes après température atteinte et refroidies à l'air.

RECUI TS A

N°	Ecroui	.400	.500	.550	.600	.650	.700	.750	.800	.850	.900	
1	R	54,5	53	47	45	41,3	35,5	30	37,6	36,8	38,6	38,2
	A%	7	12	17,5	19,5	23,5	34	34	31	31	30,5	31,2
2	R	70,4	68,5	68,2	66,2	65,1	58,9	54,5	58,5	60,1	61	
	A%	8	14	15	16,5	18,5	20	23	21,3	22,5	22,5	
3	R	68,3	67,6	66,4	65,4	56,6	56,3	51,5	54,5	55,5	56,1	57,3
	A%	8,5	10	12	13	21	20,3	23,7	24	24	22,5	23
4	R	87,6	84,8	82,6	76,5	69,6	64,9	65,2	74,5	75,4	76,7	
	A%	6	7	11	13	17	21	19	17	15	16	

Nous avons donc constaté pour chaque acier recuit entre 650 et 700° une chute de résistance à laquelle correspondait une augmentation de l'allongement. Cette diminution est d'environ 2 kilogs pour l'acier doux, 5 kilogs pour les aciers demi-durs, 10 kilogs

pour les aciers durs, elle est due, d'une part à la coalescence de la perlite pour les recuits à température inférieure à 700° et à la transformation partielle en sorbite pour les recuits à températures supérieures à 700°, comme le montrent les micrographies ci-jointes. Par suite il est évident que la chute doit être d'autant



Contribution à l'étude des aciers étirés à froid

plus accentuée que l'acier est plus carburé, comme le montrent les résultats obtenus.

Il y a donc lieu de distinguer dans l'industrie de l'étirage à froid deux températures différentes de réchauffement 1° un recuit intermédiaire coalescent au voisinage de 700°, qui fait simplement disparaître l'écroûissage ; 2° un recuit final qui, s'il ne détruit pas toujours la perlite globulaire, en transforme au moins une grande partie à l'état sorbitique, puisque nos réchauffements sont suivis de refroidissement à l'air calme. En fait, 10 minutes à 850° suffisent pour restituer au métal ses propriétés normales de résistance et d'allongement.

Toutefois, pour l'acier doux, le phénomène de déformation critique agit particulièrement sur la fragilité sans que son action apparaisse aux essais de traction. On sait qu'il faut entendre par déformation critique des écroûissages de taux déterminé dont l'action sur l'acier doux (0,18 % C au maximum) ne peut être détruite par les recuits à des températures comprises entre 650° et 850°.

Les recuits aux températures comprises dans cet intervalle rendent le grain grossier et le métal cassant. On sait que dans la pratique de l'étirage à froid, il faut voir là l'origine de la plupart des criques qui se produisent dans les aciers doux.

L'intervalle de la déformation critique a été fixé par POMP entre 8 et 16 pour 100 et OBERHOFFER indique un maximum de grossissement du grain à 10 pour 100 d'écroûissage. L'acier N° 1 qui avait subi des déformations critiques présentait en effet une structure grossière de la ferrite pour tous les recuits à température inférieure à 900°, tandis qu'un autre acier doux réduit par étirage de 63 pour 100 montrait déjà après recuit à 650° une structure très fine de ferrite (fig. N° 7 et 8).

Il se produit donc dans les aciers doux, à côté de la transformation de la perlite qui est négligeable puis-

que la quantité de carbone est faible, des modifications de la ferrite plus importantes. Il y a lieu dans le cas présent de donner un recuit final à une température supérieure à 900° qui en transformant le fer α en fer γ régénère la structure normale de l'acier doux.

L'acier doux étiré à 63 % (N° 5) dont la composition chimique était :

C	Si	S	P	Mn
0,11	0,057	0,037	0,012	0,45

donna les résultats suivants à la traction :

RECUIT A					
	Ecroui	650°	780°	840°	930°
R	64,5	37,7	39,1	40	40
A%	1,5	30	28,5	29	29

ACIER ÉCROUÏ — $G = 200$

Acier doux N° 5. Par suite d'un écrouissage excessif, 60 %, le grain de ferrite est complètement disparu.

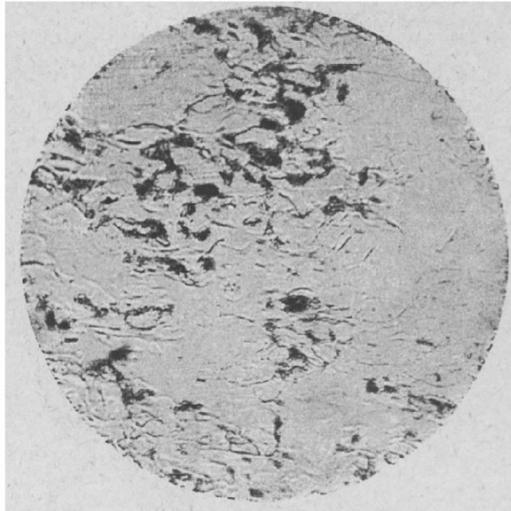


Fig. 1

ACIER DOUX (N° 1) — Recuit à 650°
(Ferrite grossière et perlite globulaire)
G = 200

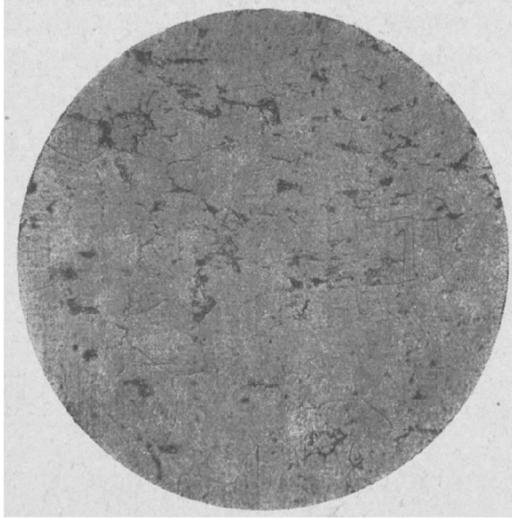


Fig. 2

G = 1000

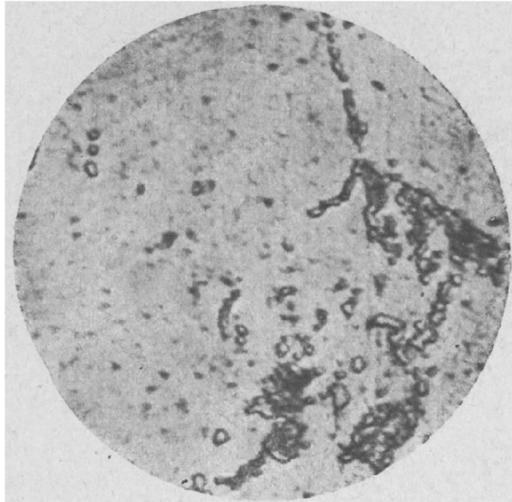


Fig. 3

ACIER DOUX (N° 1) — Recuit à 750°
(Ferrite grossière et perlite mi globulaire, mi-sorbitique)
G = 200

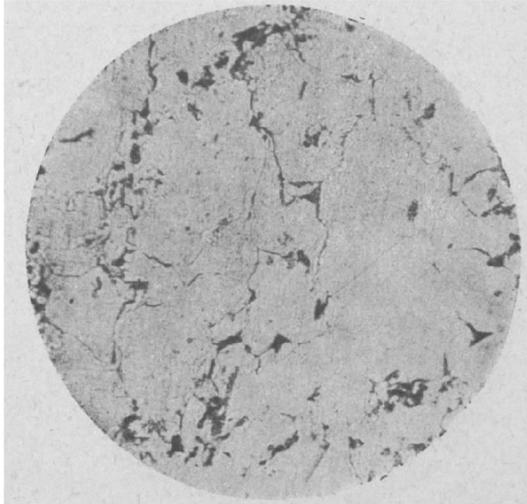


Fig. 4

G = 1000

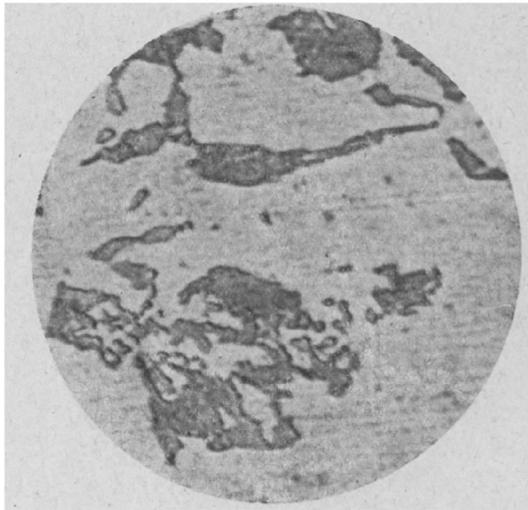


Fig. 5

ACIER DOUX (N° 1) — Recuit à 900°

(Ferrite fine et perlite sorbitique)

G = 200

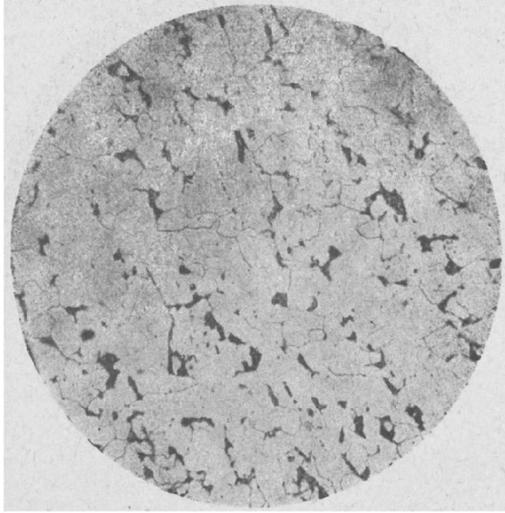


Fig. 6

G = 1000

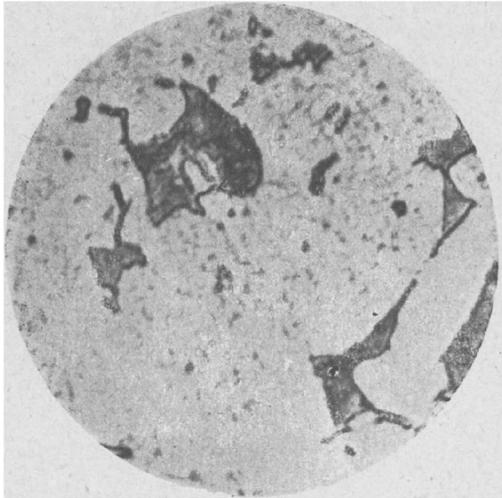


Fig. 7

ACIER N° 5 — Recuit à 650°
(Ferrite fine et perlite globulaire)
G = 200

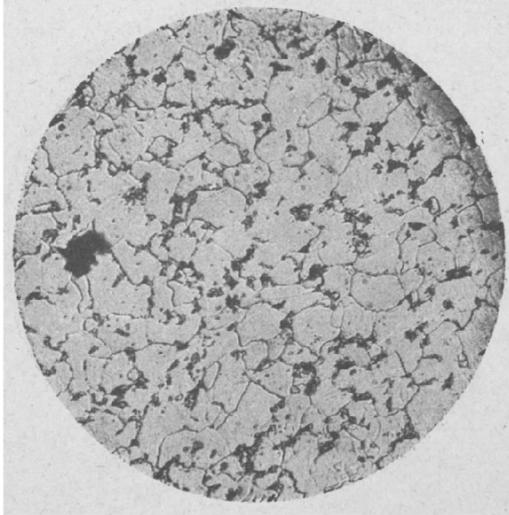


Fig. 8

Le même recuit à 930°
(Ferrite fine et perlite sorbitique) G = 200

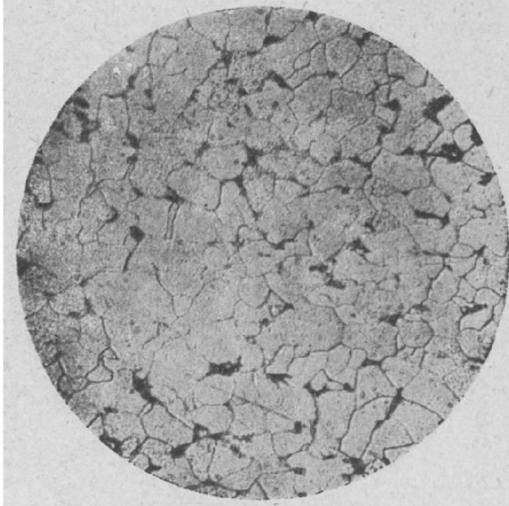


Fig. 9

ACIER N° 3 — Recuit à 700°
(perlite globulaire)
G = 1000

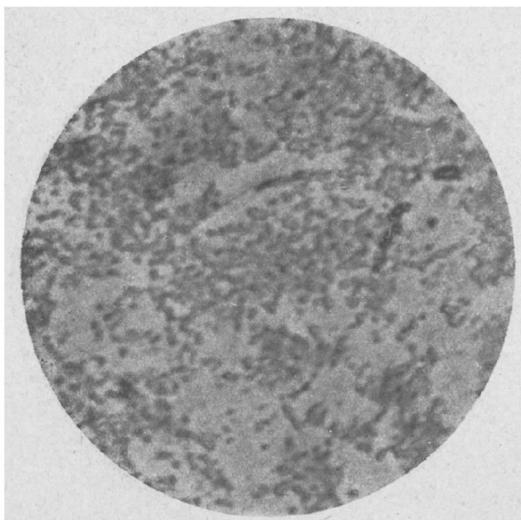


Fig. 10

Le même recuit à 900°
(perlite sorbitique)

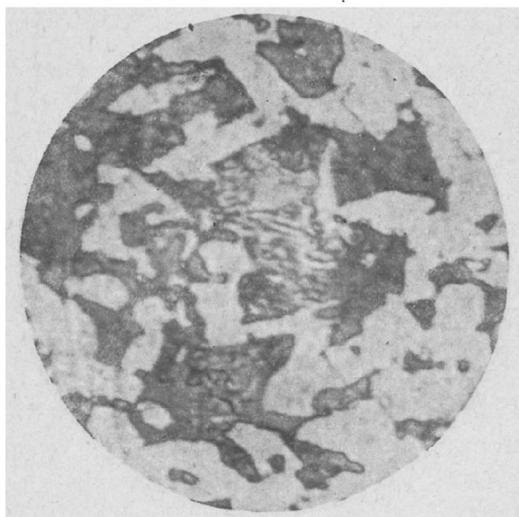


Fig. 11

ACIER AU SILICIUM recuit à 700°
(perlite divorcée en globules et rubans) G = 1000

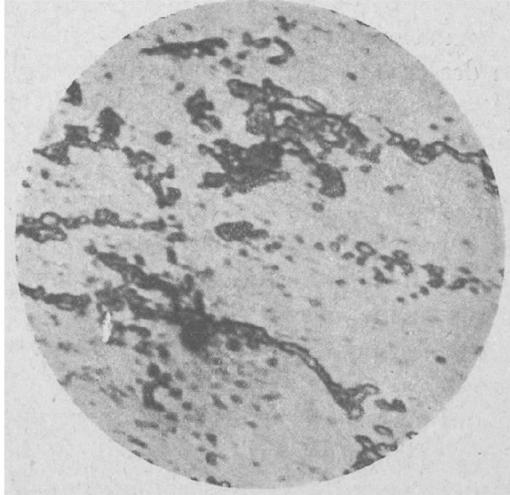


Fig. 12

Acier au manganèse recuit à 700°
(perlite globulaire) G = 1000

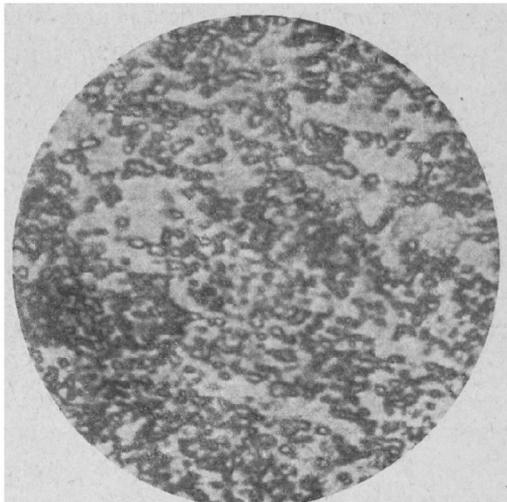


Fig. 13

MICROGRAPHIES. — Nous avons donné les micrographies des aciers doux aux grossissements 200 et 1000. Le grossissement 200 montre la structure d'ensemble du réseau de ferrite et permet ainsi de différencier deux aciers de même nuance (N° 1 et N° 5) qui ont subi des écrouissages différents (fig. 1). Le grossissement 1000 donne les détails de la perlite et permet de distinguer facilement l'état globulaire et l'état sorbitique de la cémentite.

Les figures 2 et 4 montrent un grain grossier de ferrite, qui correspond à un acier doux ayant subi des écrouissages et recuits critiques, tandis que la figure 6 montre le même acier régénéré par recuit au point A'. Au grossissement 1000 la figure 3 montre l'état globulaire de la cémentite de l'acier recuit à 650°, la figure 5 qui correspond à l'échantillon recuit à 750° montre un mélange de perlite globulaire et de sorbite et la figure 7 montre l'état sorbitique de la perlite du même acier recuit à 900° et refroidi à l'air. Les aciers 3 et 4 présentent les mêmes structures mais avec une quantité de perlite beaucoup plus grande et en rapport avec la teneur en carbone de ces aciers.

Certains auteurs ont étudié l'action des corps étrangers sur le phénomène de la coalescence. KORBBER et KOSTER publiaient le 11 Décembre 1924 dans « Stahl und Eisen » un mémoire relatif à la coalescence de la cémentite sous l'effet d'un recuit prolongé au voisinage de 700° d'aciers hypoentectoïdes contenant des pourcentages en corps étrangers variables entre 0,5 et 1 %, et ils concluaient que le manganèse et le silicium retardaient la coalescence.

Nous n'avons pas constaté que le silicium et le manganèse retardaient la coalescence de la cémentite, au point qu'il dût en être tenu compte dans l'étirage à froid.

Les deux aciers suivants

N°	C	Si	S	P	Mn
6	0,185	0,95	0,036	0,031	0,53
7	0,390	0,21	0,020	0,032	1,07

étirés comme précédemment ont fourni les résultats ci-dessous :

RECUI TS A

N°	Ecroui	.400	.500	.550	.600	.650	.700	.750	.800	.850
6	R	74,8	69,7	63,5	60,5	51,9	51	50,5	52,5	52,7 53,6
	A	5	12	13	14	22	27	28	22	25 24
7	R	78,2	75,7	73,9	71,5	69,1	63,2	59	62,6	65,7 66,1
	A	7	10	11,5	13,5	15,2	18,7	23	20,5	22,5 21,2

Les résultats des essais mécaniques ont été confirmés par l'examen micrographique ; tous nos aciers écrouis ou recuits à basse température présentaient une ferrite déformée, ponctuée de perlite globulaire. Les recuits à 650-700° donnaient la structure des aciers coalescés normaux, et c'est seulement vers 750° que la sorbite commençait à apparaître. Les micrographies ci-jointes fig. 12-13 montrent un état de la coalescence aussi bien marqué sur les aciers au silicium et au manganèse que sur les aciers normaux.

En résumé nous avons établi les courbes de résistance et d'allongement pour des aciers hypoeutectoïdes, en nous plaçant exactement dans les conditions de la pratique industrielle. Ces courbes présentent une singularité remarquable à 700° et peuvent être d'une application journalière chez les étireurs au banc. Puisse l'attention des étireurs être attiré sur ce point dont ils ne soupçonnent généralement pas l'importance.

ETUDE DE LA DURETÉ

Les essais de dureté ont été exécutés avec l'appareil de GUILLERY du type 3000 kilogs et bille de 10 ^m/_m de diamètre. Ils confirment pratiquement les résultats obtenus aux essais de traction.

Nous donnons, ci-dessous les résultats obtenus pour l'acier à 0,60 de carbone, qui est le plus caractéristique par suite de sa haute teneur en carbone et nous mettons en regard de la dureté Brinell Δ , la résistance

R' calculée d'après la formule $R = \frac{0,34}{\Delta}$, et la résis-

tance R² obtenue à la traction. Nous donnons, en outre, le diamètre de l'empreinte d, et la différence constatée entre la résistance obtenue et la résistance calculée.

Acier à 0,60 de Carbone

Recuit	d	Δ	R1	R2	Différence
15°	3,8	255	87	87,6	— 0,6
400°	3,85	248	84	84,8	— 0,8
500°	3,95	235	80	82,6	— 2,6
550°	4,1	217	74	76,5	— 2,5
600°	4,15	212	72	69,6	+ 2,4
650°	4,3	196	67	64,9	+ 2,1
700°	4,4	187	64	65,2	— 1,2
750°	4,1	217	74	74,5	— 0,5
800°	4,1	217	74	74,4	— 1,4
850°	4,1	217	74	76,7	— 2,7

Pour les aciers doux, demi-dur, au manganèse et au silicium, nous avons fait les essais de dureté des éprouvettes recuites à 15, 500, 650, 700 et 800°, afin d'avoir ainsi l'allure générale des courbes de dureté. Les résultats obtenus confirment également les essais de traction et indiquent une chute de la dureté aux recuits à 650°-700°, sauf pour l'acier doux dans lequel le phénomène de la coalescence n'a qu'un effet très faible.

ACIER DOUX N° 1

Recuit	d	Δ	R1	R2	Différence
15°	4,65	166	56	54,5	+ 1,5
500°	5,0	143	49	47	+ 2
650°	5,6	112	38	35,5	+ 2,5
700°	5,7	107	36	36	—
800°	5,7	107	36	36,8	— 0,8

ACIER A 0,10 DE CARBONE

Recuit	d	Δ	R1	R2	Différence
15°	4,25	200	69	70,4	— 1,4
500°	4,30	196	67	68,2	— 1,2
650°	4,60	170	58	58,0	— 0,9
700°	4,75	159	54	54,5	— 0,5
800°	4,60	170	58	60,1	— 2,1

ACIER AU SILICUM

Recuit	d	Δ	R1	R2	Différence
15°	4,1	217	74	74,8	— 0,8
500°	4,25	192	65	63,5	+ 1,5
650°	4,85	153	52	51,0	+ 1
700°	4,9	149	51	50,5	+ 0,5
800°	4,7	163	55	52,7	+ 2,3

ACIER AU MANGANÈSE

Recuit	d	Δ	R1	R2	Différence
15°	4	228	78	78,2	— 0,2
500°	4,1	217	74	73,9	+ 0,1
650°	4,45	183	62	63,2	— 1,2
700°	4,6	170	58	59,0	— 1
800°	4,35	192	65	65,7	— 0,7

En somme, les courbes de dureté présentant la même allure que les courbes de traction, et l'appareil Guillery serait suffisant dans la pratique de l'étirage à froid pour contrôler les effets des écrouissages et recuits successifs.

La singularité présentée à 650-700°, par les essais de traction et de dureté des aciers étirés à froid, a sa réplique dans l'étude de la corrosion.

Nous avons procédé aux essais de corrosion des aciers précités dans l'acide sulfurique à divers degrés de concentration, en passant de l'acide dilué à 2 % à l'acide sulfurique à 98 % et aux oleums à 20 et 60 % de SO³.

Etude de la corrosion dans l'acide sulfurique à divers degrés de concentration des aciers étirés à froid.⁽¹⁾

Les premiers essais ont été effectués avec l'acier à 0,60 de carbone qui, d'après sa teneur en carbone, devait donner les résultats les plus caractéristiques.

Les éprouvettes utilisées avaient toutes une surface d'environ 3000 ^{cm}²/m².

L'essai dans l'acide sulfurique dilué a eu lieu à une température moyenne d'environ 14°. Les éprouvettes ont été immergées dans le même vase contenant deux litres de liqueur à 2 pour cent d'acide sulfurique, et laissées jusqu'à neutralisation de la solution.

Voici les résultats obtenus qui, comparés entre eux, indiquent l'allure de la courbe de corrosion dans les acides très dilués.

Températ. de recuit final	perte de poids	Températ. de recuit final	Pertes de poids
15°	2,668	650°	1,114
400°	1,433	700°	1,072
500°	1,359	750°	1,680
550°	1,200	800°	1,080
600°	1,183	850°	1,207

On a un maximum de corrosion pour l'acier écroui et un minimum très net pour l'acier recuit à 700°.

Nous avons ensuite procédé à l'attaque par un acide à 98 % d'acide sulfurique, contenant des traces de vapeurs nitreuses comme impureté. Comme nous allons le voir, on a encore ici un minimum d'attaque assez net pour l'acier recuit à 700°, minimum que l'on ne retrouvera plus dans l'acide à 98 % SO⁴ H⁺ pur.

(1) C. R. de l'Académie, T. 180, p. 1942, 22 Juin 1925.

*Dans SO² H² 98 % impur, température moyenne 14°
immersion : 240 heures.*

Températures de recuit final	Perte de poids	Perte au m ² 24 h.
15°	0,097	3,233
400°	0,085	2,833
500°	0,087	2,900
550°	0,078	2,600
600°	0,068	2,266
650°	0,074	2,466
700°	0,067	2,233
750°	0,075	2,500
800°	0,073	2,433
850°	0,085	2,833

Nous avons enfin procédé à l'attaque par l'oléum à 20 % en vase ouvert. Les résultats obtenus sont les suivants :

Dans l'oléum à 20 % SO² — Température moyenne — Immersion : 240 h.

Températures de recuit final	Perte de poids	Perte au m ² 24 h.
15°	0,026	0,866
400°	0,040	1,333
500°	0,084	2,800
550°	0,048	1,600
600°	0,069	2,300
650°	0,090	3,00
700°	0,129	4,300
750°	0,021	0,700
800°	0,0205	0,683
850°	0,022	0,733

Tandis que nous obtenions un minimum d'attaque pour les échantillons recuits à 700° et immergés dans l'acide sulfurique à divers degrés de concentration, nous obtenons par contre un maximum très net en présence de l'anhydride sulfurique, suivi d'une chute très brusque pour les échantillons recuits aux températures supérieures à 700°.

Ce fait remarquable devait être confirmé dans la

suite, et avant d'aborder une étude comparée des divers aciers, nous avons repris l'acier 1/2 dur n° 2 qui nous a donné les résultats suivants :

Dans SO² II² à 98 % impur — Température moyenne : 7° — Immersion 240 heures.

Température de recuit final ..	Ecroui	650°	700°	800°
Perte de poids	0,0635	0,052	0,0445	0,0515
Perte rapportée au m ² par 24 h.	2,116	1,733	1,483	1,716

Dans l'oléum à 20 % de SO³ — Température moyenne 14° — Immersion 240 heures

Température de recuit final ..	Ecroui	650°	700°	800°
Perte de poids	0,075	0,148	0,326	0,057
Perte rapportée au m ² par 24 h.	2,500	4,933	10,860	1,900

Ces résultats, obtenus dans les mêmes conditions, confirmaient pleinement les premiers.

Par la suite, nous avons entrepris la comparaison des divers aciers en les plaçant dans des conditions absolument identiques. L'attaque dans l'acide dilué à été opérée avec une solution à 2 % renouvelée après chaque période de 24 heures et avec un volume suffisant pour que l'on puisse admettre que la concentration en acide soit restée constante. L'attaque dans l'acide à 98 % a eu lieu avec un acide pur, et dans les oléums à 20 et 60 % de SO³ elle a été faite en vase clos, sous cloche avec joint de mercure, afin d'éviter des déperditions trop fortes en SO³ et la cristallisation de l'acide pyrosulfurique à environ 40 % de SO³.

Voici exprimés en grammes par 24 heures et par mètre carré, les principaux résultats observés sur les éprouvettes écrouis ou recuites finalement à la température t et ensuite décapées.

ATTAQUE PAR LES ACIDES SULFURIQUES

Acide sulfurique à 2 pour 100 — Durée 72 heures
— Température moyenne : 20°

Acier	Ecroûi	t = 500	t = 650	t = 700	t = 800
N° 1	252,6	137,5	105,4	115	122,3
2	241,4	—	159,7	130,8	181,1
4	340,0	164,5	132,7	122,6	313,1
6	296,2	221,2	211,0	186,2	228,2
7	237,3	143,2	144,0	144,4	143,1

On constate donc en général un minimum d'attaque pour le recuit final à 700°. Ceci confirme le sens de la courbe trouvée dans l'essai préliminaire et donne en outre des pertes de poids qui correspondent à des conditions d'essais bien déterminées. La corrosion est d'autant plus forte que la teneur en carbone est plus grande ; l'acier au manganèse (n° 6) donne des chiffres plus forts que l'acier n° 2 qui lui est comparable sauf pour la teneur en manganèse.

Acide sulfurique à 98 pour 100 (durée 240 heures — température moyenne 14°)

Acier N°	Ecroûi	t = 650	t = 700	t = 800
1	0,640	0,633	0,640	0,716
2	0,673	0,716	0,689	0,666
4	0,696	0,690	0,693	0,686
6	0,683	0,713	0,663	0,656
7	0,673	0,850	0,716	0,806

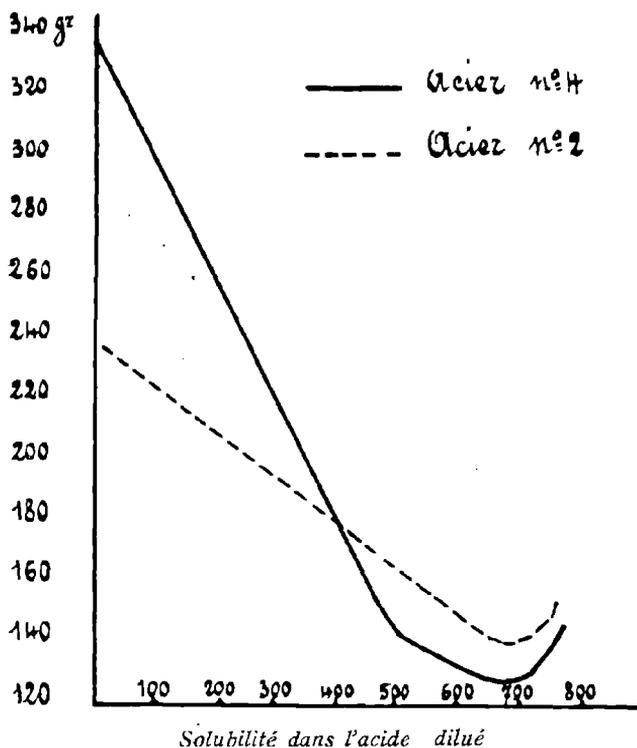
Ici, l'attaque semble s'uniformiser, tandis que dans l'acide à même concentration, mais légèrement impur, les courbes obtenues pour les aciers n° 2 et n° 4, montraient un minimum net pour le recuit à 700° et une corrosion beaucoup plus forte.

ATTAQUE PAR LES OLEUMS

L'attaque par les oléums présente un caractère tout différent.

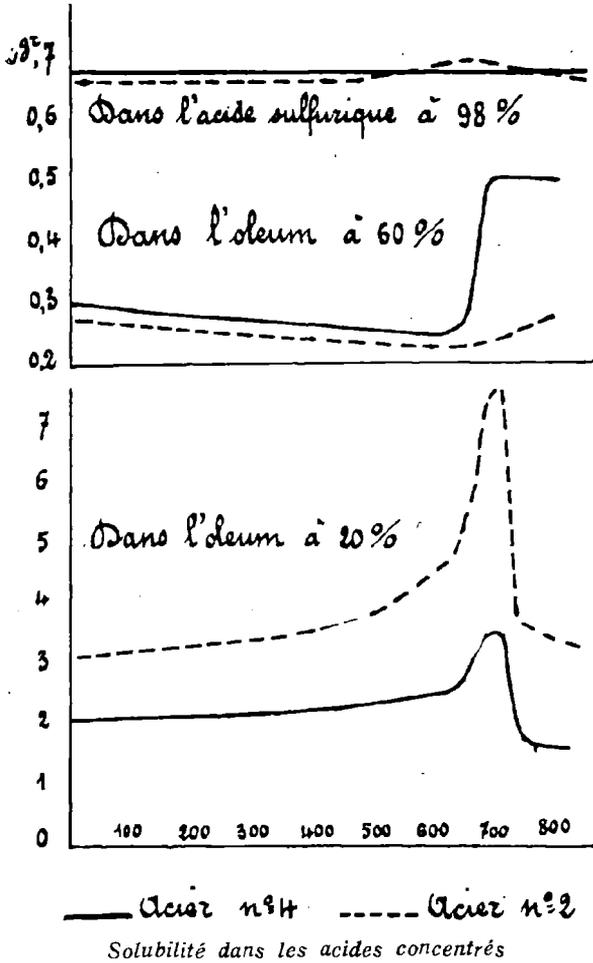
Oléum à 20 % de SO³ (durée 240 h. Température moyenne 15°).

Acier N°	Ecroûi	t = 500	t = 650	t = 700	t = 800
1	10,833	—	9,033	14,100	8,933
2	3,200	3,600	5,000	7,833	2,600
4	2,200	2,566	2,833	3,733	1,766
6	3,233	5,400	6,766	9,100	2,666
7	10,533	—	10,433	13,466	14,400



On obtient ici un maximum de corrosion pour tous les aciers recuits à 700°, sauf pour l'acier au silicium. Il est en outre remarquable de constater la faible corrosion de l'acier dur (n° 4) et la corrosion très forte de l'acier au silicium. L'acier 1/2 dur au manganèse (N° 6) est généralement plus corrodable que l'acier 1/2 dur ordinaire (n° 2).

Enfin, nous avons poursuivi les essais par l'étude de la corrosion dans l'oléum à 60 pour cent.



Acier N°	Ecroui	t = 650	t = 700	t = 800
1	0,233	0,260	0,266	0,433
2	0,283	0,233	0,263	0,296
4	0,313	0,250	0,536	0,516
6	0,443	0,253	0,300	0,326
7	0,666	0,300	0,416	0,416

La corrosion est ici très faible et il devient difficile de tirer une loi aussi nette relative à l'action du recuit, on peut toutefois distinguer un maximum à 700° pour l'acier dur (N° 4).

CONCLUSION : 1° Le recuit final coalescent à 700° qui donne lieu à une chute de la résistance à la traction avec augmentation corrélatrice de l'allongement, est précisément celui qui donne lieu à un minimum de corrosion dans l'acide dilué et le maximum dans l'oléum à faible concentration en SO².

2° S'il est préférable d'utiliser l'acier doux pour les pièces susceptibles d'être attaquées par l'acide dilué, il vaudra mieux, pour les oléums, employer les aciers carburés 1/2 durs ou durs qui sont moins corrodables par ceux-ci.

3° Enfin, si l'on considère l'action des différentes liqueurs d'attaque et que l'on passe des plus diluées aux plus concentrées, on constate que la corrosion diminue régulièrement au fur et à mesure que la concentration en SO² H² augmente, mais remonte avec l'oléum à 20 pour 100 et redescend à son minimum avec l'oléum à 60 pour 100 de SO².

On a, par exemple, pour les aciers recuits à 800° :

CONCENTRATION EN SO²

Acier N°	1,6 %	53 %	80 %	85 %	92,6 %
1	122,3	38,20	0,716	8,933	0,433
2	181,1	38,83	0,666	2,600	0,296
4	313,1	40,50	0,686	1,766	0,516
6	228,2	42,43	0,656	2,666	0,326
7	143,1	38,61	0,806	14,400	0,416

Les fontes pouvant être employées concurremment avec les aciers, en particulier dans les canalisations, nous avons été amené naturellement à faire l'étude comparée de la corrosion des fontes, mais avant d'aborder ce sujet, il nous reste à faire l'étude de la fragilité, propriété qui a une importance très grande tant au point de vue de l'étirage qu'à celui de la qualité du produit fini prêt à être livré au commerce.

Etude de la Fragilité (1)

Les éprouvettes des essais de résistance à la traction et à la corrosion ont été prélevées sur des tubes minces n'ayant plus en fin d'étirage que 4 mm. d'épaisseur ; pour les essais de fragilité, sur barreau entaillé, on a du étirer sur forte épaisseur afin de pouvoir découper des éprouvettes carrées de 10 mm. de côté. Les essais ont été faits sur des éprouvettes Mesnager de 2 mm. d'entaille et de 55 mm. de long, avec le mouton-pendule Charpy de 30 kgm.

Les aciers étudiés ont la composition suivante :

N°	C	Si	S	P	Mn
1	0,115	0,056	0,027	0,026	0,50
2	0,136	0,046	0,020	0,020	0,71
3	0,300	0,084	0,024	0,027	0,85
4	0,480	0,178	0,024	0,034	0,78

Les produits bruts de laminage sont plus ou moins réguliers dans leurs dimensions, ce n'est qu'après un ou plusieurs passages à la filière qu'ils ont une épaisseur constante. Par suite, en vue d'obtenir des chiffres de résilience qui se tiennent, il faut nécessairement négliger au moins le premier passage à la filière qui rectifie tout simplement les dimensions du produit à étirer. Aucun de nos essais n'a été effectué sur des tubes simplement calibrés, mais après calibrage nous avons étiré à des taux connus et mesurés expérimentalement, et nous avons ensuite procédé aux essais de fragilité.

ACIER DOUX N° 1. — Les recuits intermédiaires lors de l'étirage ont été faits à 700°. Après chaque étirage, on a prélevé un bout dans lequel on a découpé des éprouvettes, afin de suivre le métal dans ses diverses transformations. Pour le calibrage, on a étiré d'environ 4,5 %.

(1) C. R. du 11 Janvier 1926, p. 131.

Les chiffres donnés ci-dessous sont la moyenne d'un grand nombre d'essais effectués sur des éprouvettes recuites finalement dix minutes aux températures indiquées.

Températures de recuit	Nombre de passages à la filière et taux d'écouissage			
	1 ^e à 10%	2 ^e à 13%	3 ^e à 17,7%	4 ^e à 13,3%
15°	19,71	16,0	13,5	12
100°	21,50	17,80	15,8	16,4
200°	21,31	13,0	10,0	17
300°	20,34	7,7	8,0	8
400°	20,52	14,0	14,0	20
500°	22,66	18,0	18,0	23
600°	22,80	20,0	20,0	23
700°	23,37	27,0	27,0	27
800°	23,68	26,0	27,0	26
900°	27,61	27,2	30,0	26,5
1000°	27,80	26,0	29,0	25

La fragilité à 300° n'a commencé à se faire sentir qu'après le deuxième étirage et en général l'allure de la courbe est la suivante : augmentation légère pour le recuit à 100°, puis diminution brusque à 200 et 300° et ensuite remontée rapide jusqu'à 700°, température à partir de laquelle la résilience se stabilise ou augmente légèrement lorsqu'on arrive à 900 et 1000°.

ACIER DOUX N° 2. — Celui-ci a subi pour calibrage un écouissage d'environ 3 %. Dans le cas présent, les recuits intermédiaires ont été exécutés à 900°. Nous donnons ci-dessous les résultats obtenus après chaque étirage :

Températures de recuit	Nombre de passages à la filière et taux d'écouissage			
	1 ^e à 8,7%	2 ^e à 12%	3 ^e à 11,4%	4 ^e à 11,9%
15°	16,6	16,6	18,4	11,4
100°	17,4	17,6	18,6	11,6
200°	16,7	15	17,7	1,14
300°	17	8	11,6	1,18
400°	16,9	15	5,15	2,3
500°	17,4	17,4	6,75	6,74

Températures de recuit	Nombre de passages à la filière et taux d'écrouissage			
	1 ^{er} à 8,7%	2 ^e à 12%	3 ^e à 11,4%	4 ^e à 11,9%
600°	19,3	20,7	10,87	17,7
700°	19,4	21,1	23,07	27,52
800°	20,5	21,7	22,25	26,30
900°	21,6	23,6	22,36	28,05
1000°	22,9	23,7	26	30

Ici encore, la fragilité au bleu n'apparaît pas après le premier étirage, mais elle apparaît nettement au second et plus encore au 4^e. Après le 3^e passage à la filière, on constate des résultats très faibles pour les recuits compris entre les températures de 300 et de 600° et après le 4^e on obtient, entre 100 et 600°, des chiffres excessivement bas de résilience. Le maximum est ici nettement atteint par le recuit à 1000°.

En somme, si l'on considère uniquement l'allure générales des courbes, on remarque qu'elle est celle que l'on pouvait prévoir d'après ce que nous savons. On sait, en effet, que le recuit au bleu diminue notablement la résilience et que le recuit au point A. 3 en transformant la ferrite en austénite régénère complètement la structure normale et restitue au métal ses propriétés ordinaires.

Un fait est ici à noter, c'est que dans ces essais d'étirages sur fortes épaisseurs, on ne perçoit pas d'après l'essai de fragilité, les effets de l'écrouissage critique étudiés par POMP et OBERHOFFER, bien que les taux d'écrouissage subis par ces aciers soient ceux qui devraient causer une grande fragilité à tous les échantillons recuits entre 650 et 850°. Sans doute, faut-il attribuer cela à un écoulement différent du métal dans les étirages sur pièces épaisses et sur pièces minces.

Nous avons enfin étudié les aciers demi-durs, chez lesquels le phénomène de l'écrouissage se complique du phénomène de la coalescence.

ACIER N° 3. — Celui-ci, après deux étirages de 8 % et recuit intermédiaire à 700°, présente pour tous les

recuits inférieurs à 700°, un mélange de sorbite et de perlite globulaire et sa structure après recuit aux températures supérieures à 700° présente une quantité plus grande de sorbite.

Les résultats suivants ont été obtenus aux essais au choc :

Températures de recuit	Résilience	Températures de recuit	Résilience
15°	5,36	600°	7,23
100°	4,6	700°	10,1
200°	3,0	750°	10,8
300°	2,9	800°	13,6
400°	4,1	900°	12,9
500°	5,7	1000°	13,6

Le maximum est ici atteint, lors des recuits aux températures voisines du point A 3 de ce métal ; Il n'en est plus ainsi après un 3° étirage de 9 % qui a achevé la coalescence de la cémentite. Le recuit aux diverses températures donne en effet les résultats suivants :

Températures de recuit	Résilience	Températures de recuit	Résilience
15°	5,77	600°	9,56
100°	5,85	700°	17,5
200°	3,35	750°	15,53
300°	3,96	800°	15,02
400°	5,06	900°	13,9
500°	7,46	1000°	13,8

Les éprouvettes recuites à 700° présentaient ici des globules de cémentite de très faible diamètre, mais toute la perlite était divorcée. Enfin, les recuits supérieurs à 700° régénéraient la sorbite jusqu'à disparition complète des globules pour les recuits supérieurs à 900°

Le maximum de résilience (17,5 kgm) atteint à 700° est la moyenne des chiffres suivants : 18,45 — 16,90 — 18,79 — 16,05.

Le même acier, après un 4^e étirage de 9 % donne les chiffres suivants :

Températures de recuit	Résilience	Températures de recuit	Résilience
15°	5,77	600°	16,76
100°	5,10	700°	19,76
200°	4,00	750°	12,35
300°	5,41	800°	14,51
400°	5,64	900°	13,21
500°	7,42	1000°	14,91

Le maximum à 700° (19,76) est la moyenne des chiffres suivants : 20,85 — 20,00 — 18,45.

Enfin, après un étirage supplémentaire de 16 % et recuit intermédiaire à 700°, le recuit final donne les chiffres suivants :

Températures de recuit	Résilience	Températures de recuit	Résilience
15°	5,7	600°	13,7
100°	4,58	700°	16
200°	3,6	750°	13,3
300°	2,3	800°	14
400°	4,4	900°	13,2
500°	6,4	1000°	13,4

Ces résultats confirment les précédents. En effet, pour tous les recuits inférieurs à 600° on a ici des chiffres de résilience très faibles avec minimum vers 300°. A 600° la résilience augmente fortement, on passe par un maximum très net à 700° et on se stabilise ensuite jusqu'à 1.000°.

La valeur maxima atteinte à 700° est de 16 kgm ; voici les chiffres qui ont servi à établir cette moyenne :

18,79 — 17,42 — 14,68 — 15,19 — 15,27 — 15.

Or, le même acier brut de laminage avait une résilience de 9,28 kgm. On a donc amélioré notablement la résistance au choc de cet acier par des étirages et recuits rapides successifs à 700°.

Recuit final de l'acier n° 3 — G = 1000
Recuit à 700° — Perlite globulaire
 $\rho = 18$

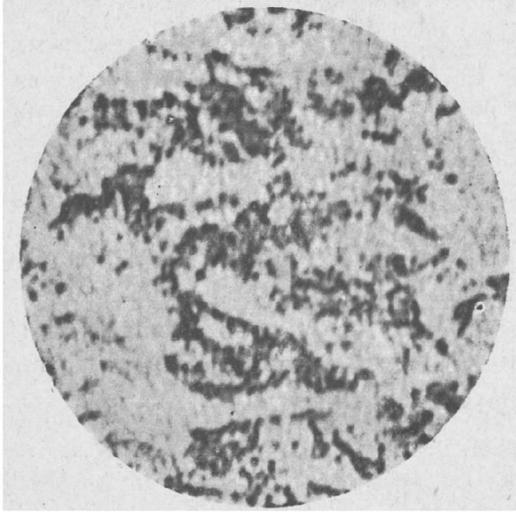


Fig. 14

Recuit à 750° — Perlite globulaire et sorbitique
 $\rho = 13,3$

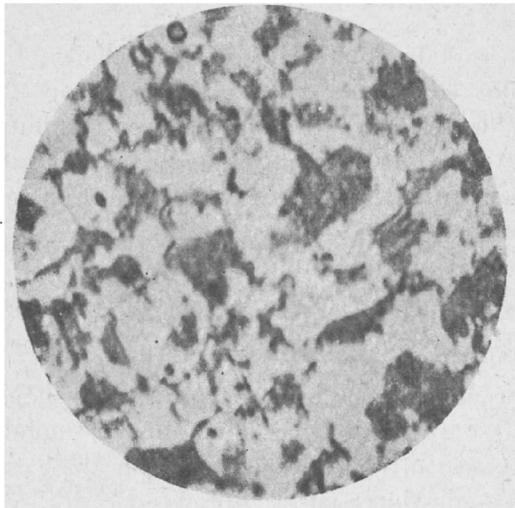


Fig. 15

Recuit à 900° — Perlite sorbitique et lamellaire
 $\rho = 13$

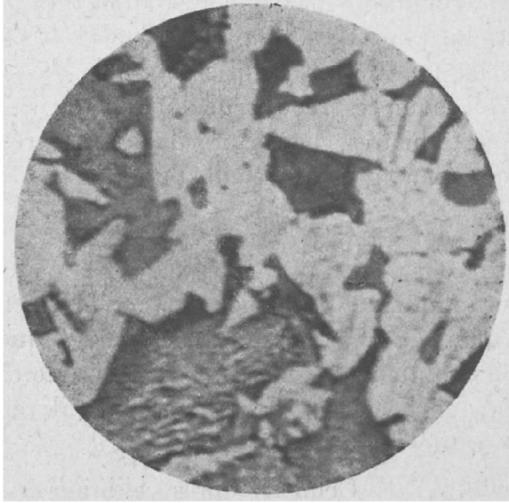


Fig. 16

Acier N °3, après 4 étirages et recuits à 700°
 $\rho = 20$ kgm.

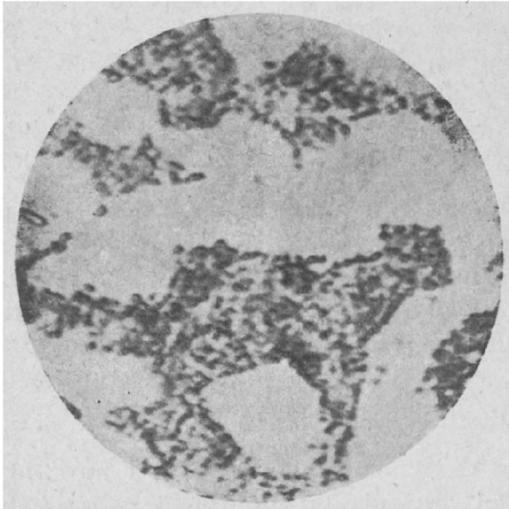


Fig. 17

Mais la structure du métal ainsi traité est celle d'un acier coalescé, c'est donc que la coalescence obtenue dans des conditions particulières augmente la résilience. Cette constatation a été vérifiée avec l'acier n° 4, mais tandis que celui-ci donnait des chiffres assez élevés pour les recuits de longue durée variant entre 1 et 6 heures, l'acier n° 3 a vu sa résilience s'abaisser même après un recuit d'une heure à 700°.

Acier N°	1 heure à 700°	2 heures	3 heures
3	$\rho = 12,1$	12,4	13

Ceci s'expliquerait probablement par l'influence du recuit prolongé sur la ferrite. L'acier n° 4 que nous allons voir, contient, en effet, une quantité de carbone plus forte que l'acier n° 3 et, par suite, il renferme une plus petite quantité de ferrite.

ACIER N° 4. — Celui-ci, après calibrage à 1,7 % étirages à 8,9 — 15,7 — 9 et 9,5 %, recuits intermédiaires à 700° et vieillissement de 100 jours après le dernier étirage, a donné les chiffres suivants :

Températures		Températures	
de recuit	Résilience	de recuit	Résilience
15°	4,6	600°	4,9
100°	5,1	700°	6,15
200°	4,8	750°	5,10
300°	4,5	800°	5,0
400°	4,0	900°	4,2
500°	4,4	1000°	4,3

On sait que pendant le vieillissement il se produit un revenu spontané d'où l'explication de la résilience relativement élevée de l'échantillon non recuit. Le maximum à 700° est de 6,15, il représente la moyenne des résultats suivants, obtenus sur 7 éprouvettes différentes :

6,46 — 6,75 — 7,03 — 6,75 — 5,36 — 5,60 — 5,10

Enfin, les recuits de longue durée à 700° ont donné les résultats suivants qui confirment les résultats obtenus par recuit rapide à 700° :

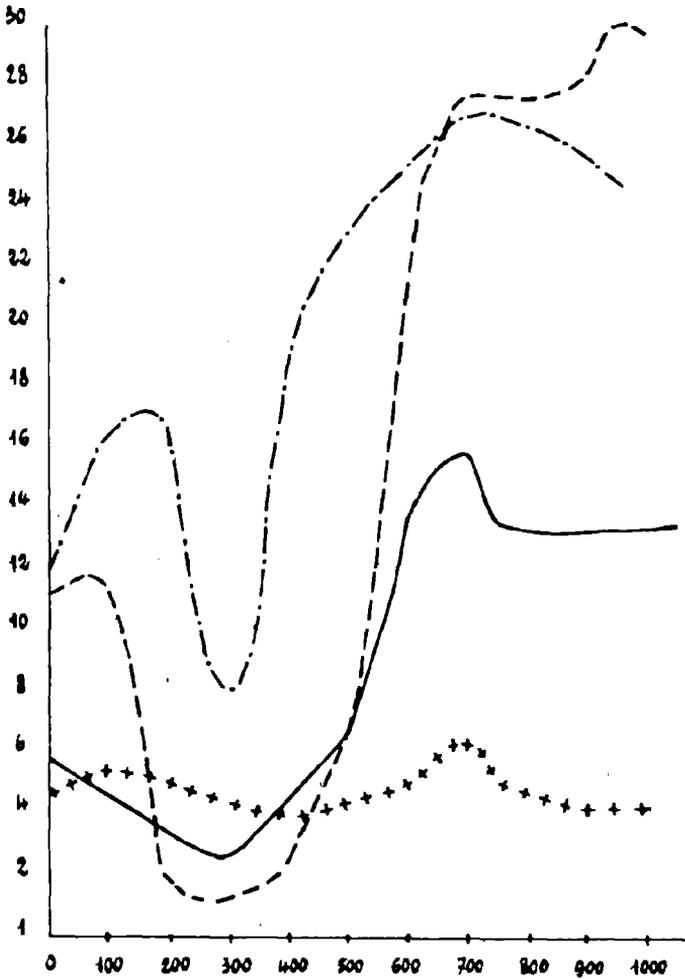
1	heure --	5,91	5,63	6,75	4,84	Moyenne :	5,78
2	»	5,91	6,75	4,84	6,04	»	5,88
3	»	6,46	6,18	6,05	6,75	»	6,38
6	»	5,45	6,32	5,45	5,77	»	5,75

On sait d'après les travaux du Colonel GRARD que le maximum de résilience est obtenu par trempe à l'eau suivie de revenu à 700°. Nous donnons ci-dessous les résultats obtenus de cette façon pour les aciers n° 3 et N° 4, et nous complétons par les chiffres de résilience obtenus avec les éprouvettes brutes de laminage, brutes de laminage et recuites au voisinage de leur point A. 3, afin de permettre la comparaison avec les chiffres obtenus après étirage à froid :

N°	Brut de laminage	et recuit au point A. 3	Trempe à 850° revenu à 700
3	$\rho = 9,28$	11,67	18,80
4	4,8	5,26	10,70

Les essais précédents prouvent l'importance du recuit à 700° non seulement au point de vue de la facilité de l'étirage à froid, ce qui est déjà connu, mais encore au point de vue de la qualité du produit final. Ils montrent que l'acier coalescé peut présenter une grande résilience, lorsque la coalescence a été obtenue par des recuits rapides. On a vu que les aciers traités de cette manière atteignaient et dépassaient même parfois le maximum obtenu par trempe vive et revenu à 700°.

Les tubes étirés à froid, pouvant dans certains cas, être mis en concurrence avec les tuyaux en fonte, nous allons maintenant étudier les fontes au point de vue spécial de la corrosion dans l'acide sulfurique à divers degrés de concentration, ce qui permettra la comparaison de ces produits différents.



--- Acier n° 1 - - - - - Acier n° 2
— Acier n° 3 + + + + + Acier n° 4

Recuit final des aciers étirés à froid
Résilience

DEUXIEME PARTIE

Etude comparée de la corrosion des fontes dans l'acide sulfurique à divers degrés de concentration.

Pour cette étude, nous avons réuni un grand nombre d'échantillons divers, comprenant quelques fontes blanches, une fonte malléable, une fonte aciérée et un grand nombre de fontes grises toutes différentes les unes des autres, réservant ainsi la plus large place aux fontes grises et de moulage, qui sont plus particulièrement désignées pour la fabrication des pièces mécaniques et des tuyaux. Parmi ces fontes grises, se trouve un lot assez important de fontes phosphoreuses et silicieuses, que l'on utilise généralement à cause de leur grande fluidité.

Comme pour les aciers, nous avons étudié leur résistance à la corrosion dans les acides à 2 % et à 98 % de $\text{SO}_4 \text{H}^2$ et dans les oléums à 20 et 60 %, après quoi, la sélection étant faite, nous avons choisi les 3 fontes grises qui avaient donné les meilleurs résultats et nous leur avons fait subir des traitements thermiques en vue de produire le phénomène de la coalescence, qui, nous l'avons vu, joue un rôle important dans la résistance à la corrosion.

Nous donnons ci-dessous l'analyse de chacune de ces fontes affectées d'un numéro d'ordre qui servira à les repérer lorsque nous en ferons le classement en fonction du degré de corrosion.

ANALYSE DES FONTES

N°	Cc	Cgr	C. T.	Si	S	P	Mn
1	0,454	3,4	3,85	2,201	0,036	1,08	0,68
2	0,45	3,5	3,95	2,198	0,036	0,37	0,76
3	0,525	3,9	4,42	1,710	0,037	0,06	0,98
4	0,468	3,40	3,86	1,710	0,151	0,10	0,76
5	0,50	3,50	4,00	1,61	0,062	0,094	0,64
7	2,60	0,10	2,70	0,044	0,013	0,120	3,97
9	1,70	0,30	2,0	0,304	0,123	0,050	0,22
10	0,55	2,8	3,35	1,616	0,073	0,738	0,47
11	0,55	3,3	3,85	1,429	0,045	0,102	0,71
12	0,55	2,9	3,45	1,429	0,059	0,566	0,53
13	0,817	2,54	3,35	1,569	0,095	0,393	0,60
14	0,50	3,10	3,60	1,522	0,043	0,074	0,60
15	(0,55 (S) / 0,84 (P)	1,30 1,50	1,85 2,34	0,685	0,204	0,084	0,25
16	0,454	3,10	3,55	2,389	0,089	1,727	0,44
17	0,319	2,90	3,219	2,108	0,053	2,341	0,38
18	0,35	3,20	3,55	1,921	0,051	1,564	0,50
19	0,075	3,70	3,775	2,436	0,068	1,413	0,50
20	0,065	3,00	3,065	2,961	0,073	1,886	0,42
21	0,065	3,80	3,865	2,014	0,076	0,02	0,48
22	0,455	2,76	3,215	2,271	0,042	0,280	0,64
23	0,50	2,92	3,420	1,921	0,043	0,360	0,60
24	0,138	3,28	3,418	2,131	0,049	0,460	0,50
25	0,416	2,98	3,394	1,804	0,053	0,330	0,52
26	0,55	3,90	4,45	2,198	0,017	0,07	3,00
27	0,065	2,975	3,040	4,15	0,012	1,70	0,64

(S) : en Superficie — (P) : en profondeur.

L'immersion dans l'acide sulfurique à 2 % a duré 72 heures, les pertes de poids ont été notées de 8 en 8 heures pendant la 1^{re} période de 24 heures, puis de 24 en 24 heures. L'allure de la corrosion en fonction du temps est restée sensiblement la même. Nous donnons ci-dessous les résultats obtenus définitivement en classant les fontes suivant leur degré de corrosion. Les pertes de poids sont exprimées en grammes au mètre carré par 24 heures.

CORROSION DES FONTES PAR $\text{SO}^4 \text{H}^2$ à 2 %

Durée : 72 heures — Température moyenne : 20°

Classement par degré de corrosion	Nos des analyses	Pertes de poids en gr. m., 24 heures	Observations
1	17	1910	Fonte phosphoreuse
2	16	1843	— — et fort silicieuse
3	27	1767	— —
4	21	1757	— —
5	18	1751	— —
6	20	1561	— —
7	19	1485	— —
8	26	1480	— manganésée
9	24	1367	— moyennement phosphoreuse
10	10	1359	— — —
11	23	1242	— — —
12	1	1192	— phosphoreuse
13	22	1102	— ordinaire
14	11	984	— —
15	12	972	— —
16	14	951	— pure
17	3	916	— —
18	2	761	— ordinaire
19	13	742	— —
20	25	653	— —
21	4	650	— grise sulfureuse
22	5	590	— — pure
23	7	446	— blanche manganésée
24	9	264	— acérée
25	15	189	— malléable sulfureuse
26	8	125	— blanche

D'après ces résultats, on peut distinguer dans le lot, 3 groupes nettement distincts, et interpréter les chiffres obtenus de la façon suivante :

1^{er} GROUPE. — FONTES LES PLUS CORRODABLES

Pertes de 1500 à 2000 grammes

Il comprend des fontes à la fois phosphoreuses et

silicieuses ainsi qu'une fonte manganésée. Certaines fontes de ce groupe contiennent très peu de carbone combiné, et leur graphite se présente sous la forme de feuilles, ce qui est normal dans les fontes grises. L'influence de l'état du carbone disparaît donc ici sous l'influence du phosphore qui est tout à fait néfaste au point de vue de la corrosion.

En résumé, le phosphore, le silicium, le manganèse, aux teneurs relativement fortes indiquées ci-contre ne semblent pas être favorables à la résistance contre les acides dilués.

2° GROUPE. — FONTES MOYENNEMENT CORRODABLES

Pertes de 600 à 1400 Grammes.

Il comprend des fontes plus pures et généralement plus pauvres en silicium et en phosphore. Une seule exception, le n° 11 à 1 % de P. qui tient la douzième place. Les N° 21 et 22 qui tiennent les dernières places de ce groupe sont relativement pauvres en silicium et en phosphore, mais le n° 21 a une teneur assez forte en soufre. Le soufre ne paraît donc pas jouer un grand rôle dans la corrosion, du moins à cette teneur.

3° GROUPE. — FONTES LES MOINS CORRODABLES

Pertes de 100 à 500 Grammes.

Il ne comprend plus aucune fonte grise ; on a eu, en effet, deux fontes blanches n° 23 et 26 (la plus corrodable étant la plus manganésée), une fonte aciérée et une fonte malléable dont le graphite est sous forme de masse compacte. La fonte malléable est celle qui contient le plus de soufre de toutes les fontes essayées. Comme nous l'avons déjà vu, le soufre, au moins à la teneur indiquée, ne paraît pas jouer un grand rôle dans la corrosion. L'état du carbone le plus favorable pour l'obtention d'une corrosion minima est donc la cémentite sous ses différentes formes.

Enfin, nous avons entrepris la comparaison des fontes les moins corrodables avec les aciers élirés à froid déjà étudiés, recuits 15 minutes au voisinage de leur point A 3 et refroidis lentement afin d'éviter la présence de tensions internes, qui ont une grande influence sur la corrosion.

Voici, exprimés en grammes par m² pour 24 heures, les pertes constatées sur les divers échantillons immergés dans le même vase, pendant le même temps :

Corrosion dans SO⁴ H² à 2 % — Comparaison des aciers et des fontes. — Durée : 72 heures — Température moyenne : 22°.

Désignation	ANALYSES :					Perte en Grs. m ² 24 h.	Observations
	C	Si	S	P	Mn		
Acier n° 1 (doux)	0,12	0,060	0,033	0,019	0,44	109	Acier (minim.)
Acier n° 2 (1/2 dur)	0,41	0,199	0,017	0,014	0,66	164	»
Acier n° 3 (dur)	0,60	0,119	0,017	0,020	0,64	137	»
Acier n° 4 (1/2 dur au Mn)	0,39	0,205	0,020	0,024	1,07	219	»
Acier n° 5 (au Si)	0,185	0,95	0,036	0,031	0,53	143	»

Désignation	ANALYSES :						Perte en Grs. m ² 24 h.	OBSERVATIONS	
	Cc	CT	S	S	P	Mn			
Fonte n° 21	0.460	3.86	1.71	0.151	0.10	0.76	742	Fonte grise (analyse n° 4)	
22	0.500	4.00	1.61	0.062	0.094	0.64	689	(= 5)	
23	2.60	2.70	0.044	0.013	0.120	3.97	332	— blanche (7)	
24	1.70	2.00	0.300	0.126	0.050	0.22	252	aciérée (9)	
	0.55	1.85	en superficie)						
25			0.605	0.204	0.064	0.25	218	— malléable — 15)	
	0.80	2.34	en profondeur)						
26	2.50	2.80	0.590	0.025	0.40	0.24	162	— blanche — 8)	

La différence de corrosion entre les aciers et les fontes grises les moins corrodables est très grande. Seules deux fontes, l'une blanche n° 26, l'autre malléable n° 25 peuvent être comparées aux aciers et donnent des pertes de poids voisines de celles des aciers demi-durs. Quant à l'acier doux, il s'écarte nettement des autres métaux en donnant le minimum de corrosion.

A la suite des essais de corrosion dans l'acide à 2 %, nous avons entrepris l'étude de l'étude des mêmes fontes immergées dans l'acide à 98 %.

ATTAQUE PAR L'ACIDE A 98 %

L'immersion a duré en tout 240 heures à la température moyenne de 21°. Les pertes de poids ont été notées après les deux premières périodes de 72 heures, puis après un total de 240 heures.

La corrosion faible dans l'acide concentré explique pourquoi nous avons dû pousser jusqu'à 240 heures d'immersion. Nous donnons plus loin le classement des fontes suivant leur degré de corrosion et les pertes de poids rapportées en grammes, par 24 heures, au mètre carré.

(Voir tableau page suivante)

CORROSION DES FONTES PAR $\text{SO}_2 \text{H}^+$ à 98° .

Durée totale: 240 heures ; Température moyenne: 21°

Classement par degré de corrosion	N° des analyses	Surface cm^2	1 ^{re} période 72 h. — Per- te de poids	2 ^e période 72 h. — Per- te de poids	Après 240 heures — Per- te de poids	Perte en $\frac{\text{Grs.}}{\text{m}^2}$ 24 h.
1	20	12.	0,022	0,019	0,069	5,75
2	1	11,5	0,020	0,016	0,058	5,043
3	27		0,027	0,014	0,060	5,041
4	2	11,9	0,0188	0,0176	0,0594	4,99
5	26	11,6	0,0204	0,0138	0,057	4,91
6	10	12.	0,0196	0,0152	0,0588	4,90
7	7	7.	0,0124	0,008	0,034	4,85
8	18	7,5	0,013	0,009	0,036	4,80
9	17	9,5	0,016	0,012	0,045	4,73
10	14	13,2		0,0178	0,062	4,69
11	19	12.	0,016	0,016	0,056	4,66
12	16	12.	0,017	0,0162	0,0552	4,60
13.	25	12,3	0,0184	0,014	0,0534	4,34
14	22	12.	0,0166	0,013	0,052	4,25
15	5	12.	0,0156	0,014	0,0506	4,21
16	8	10,5	0,0152	0,012	0,0442	4,21
17	21		0,019	0,0145	0,051	4,08
18	12	12,5	0,0094	0,0146	0,049	3,92
19	23	11,9	0,0088	0,0158	0,0456	3,83
20	11	11,7	0,0144	0,0116	0,044	3,76
21	3	13,4	0,017	0,013	0,0502	3,74
22	9	16.	0,0202	0,0128	0,0564	3,52
23	4	12,2	0,012	0,015	0,043	3,52
24	15	11,64	0,014	0,010	0,038	3,27
25	13	7.	0,0074	0,0054	0,0221	3,25

1^{er} GROUPE. — FONTES LES PLUS CORRODABLES

Pertes de 4 gr. 5 à 5 gr. 75.

Il comprend d'abord les fontes phosphoreuses ainsi qu'une fonte à la fois silicieuse et phosphoreuse, une fonte grise et une fonte blanche manganésée. Deux exceptions se présentent : les fontes n° 2 et 14 qui se classent 4^e et 10^e. Ces résultats s'accordent

avec ceux déjà obtenus dans l'acide dilué. En effet, le phosphore le silicium et le manganèse ne semblent pas favoriser la résistance à la corrosion par l'acide sulfurique pur.

2° GROUPE. — FONTES MOYENNEMENT CORRODABLES

Pertes de 3 gr. 75 à 4 gr. 50

Il comprend 7 fontes grises ordinaires, une fonte blanche et comme exception une fonte phosphoreuse.

Les fontes ordinaires se tiennent dans la moyenne comme dans l'essai précédent, par contre la corrosion des fontes blanches change d'allure. Tandis que dans l'acide dilué, les fontes blanches se classaient dans le troisième groupe, nous avons vu que la fonte blanche manganésée se trouvait ici dans le premier et la fonte blanche ordinaire dans le deuxième.

3° GROUPE. — FONTES LES MOINS CORRODABLES

Pertes de 3 gr. 25 à 3 gr. 50.

Il comprend 2 fontes grises n° 4 et 13 (qui avaient accusé dans l'essai précédent une perte de poids relativement faible), une fonte aciérée et une fonte malléable, les deux dernières se trouvaient dans le 3° groupe de l'essai précédent.

En résumé, on peut conclure que l'allure de la corrosion dans l'acide sulfurique concentré est identique à celle de la corrosion dans l'acide dilué, sauf pour les fontes blanches. En effet, le groupe de tête comprend de part et d'autre les fontes phosphoreuses, silicieuses et manganèses ; le 2° groupe comprend les fontes ordinaires, le groupe de queue comprend la fonte aciérée et la fonte malléable.

Nous avons vu précédemment que la corrosion moyenne des aciers dans $\text{SO}_4 \text{H}^+$ à 98 % était d'environ 0 gr. 700 par m^2 et pour 24 h. *On voit que la corrosion des fontes dans l'acide concentré est beaucoup plus grande que celle des aciers.* Un essai com-

Fonte Blanche N° 7.
(primausténoïde en noir, cémentite eutectique en blanc)
G = 200



Fig. 18

Fonte malléable N° 15
(nodules noirs de graphite, perlite en gris et ferrite en blanc).
G = 200

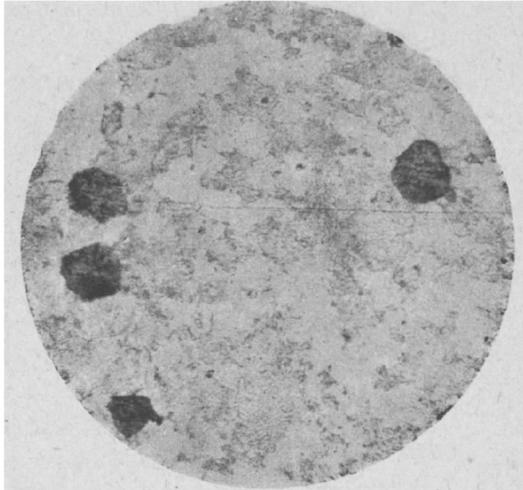


Fig. 19

Fonte N° 4.
(lamelles de graphite en noir et perlite lamellaire) G = 200



Fig. 20

Fonte phosphoreuse N° 21.
(lamelles de graphie en noir, ferrite en blanc et eutectique phosphoreux en gris). G = 200

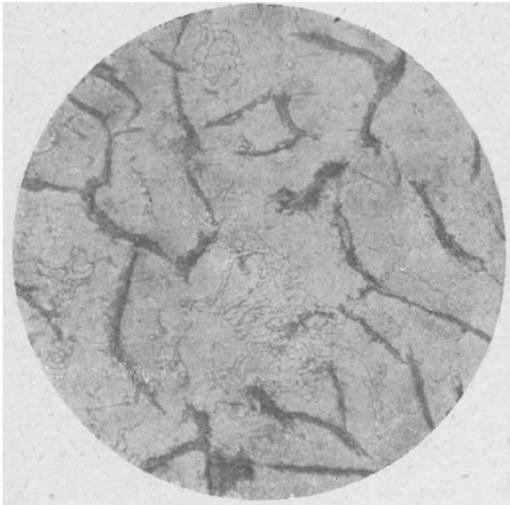


Fig. 21

paratif exécuté absolument dans les mêmes conditions de température, de durée et de concentration ne s'impose donc pas.

Les essais suivants de corrosion par l'oleum ont été exécutés en vase clos avec joint de mercure afin d'éviter des déperditions trop grandes en anhydride sulfurique.

ATTAQUE PAR L'OLEUM A 20 %

Temp. moyenne : 20°. Durée : 240 heures

Classe- ment	n° d'ana- lyse	perte de poids	Classe- ment	n° d'ana- lyse	perte de poids
1	24	41,158	14	16	0,783
2	21	28,952	15	7	0,771
3	28	25,864	16	14	0,742
4	19	24,341	17	8	0,638
5	2	11,705	18	9	0,606
6	20	11,616	19	11	0,598
7	25	9,056	20	18	0,493
8	15	8,427	21	22	0,316
9	27	4,011	22	26	0,284
10	17	2,116	23	13	0,214
11	4	2,032	24	5	0,083
12	1	1,017	25	23	0,050
13	10	0,833	26	3	0,029

Après l'immersion de 240 heures, pour une neutralisation rapide, les éprouvettes ont été jetées dans un lait de chaux, lavées à l'eau pure, puis plongées dans une solution de carbonate de soude. Malgré ces précautions, certaines éprouvettes présentaient après séchage des exsudations dues à la porosité des fontes. L'acide ayant en effet, pénétré dans les pores du métal il a été impossible de le neutraliser instantanément.

Les chiffres obtenus ici passent d'un extrême à l'autre. En effet, le groupe de tête a subi des corrosions excessives, tandis que le groupe de queue ne montre que des pertes de poids très faibles. Quinze fontes donnent des résultats inférieurs au chiffre le plus faible observé pour les aciers. Par contre, certaines fontes ne sont plus comparables avec les aciers, tant leur perte de poids est grande.

Si dans le groupe de tête on classe les 14 fontes les plus corrodables, on remarque que les fontes phosphoreuses appartiennent à ce groupe. Mais, parmi les fontes phosphoreuses, il y a lieu de distinguer celles qui contiennent du carbone combiné et celles qui n'en contiennent pas. En effet, les fontes pauvres en cémentite (0,06 à 0,07 de carbone combiné) sont plus corrodables que les autres plus carburées en cémentite (0,45 à 0,50 de C. Combiné).

Cette remarque s'accorde d'ailleurs avec celle déjà faite sur les aciers.

Le groupe des fontes les moins corrodables par l'oléum à 20 %, qui donnent toutes des chiffres inférieurs à ceux obtenus pour les aciers, comprend les fontes grises pures, la fonte blanche manganésée, les fontes blanches et aciérées.

Enfin, nous avons achevé l'étude des fontes naturelles par l'immersion dans l'oléum à 60 % SO³. Cet essai a été exécuté dans les mêmes conditions que le précédent, c'est-à-dire en vase clos avec joint de mercure.

Voici les résultats obtenus, toujours exprimés en grammes par 24 heures au mètre carré :

ATTAQUE PAR L'OLEUM A 60 %.

Durée : 240 heures — Température moyenne : 23°

Classe- ment	n° d'ana- lyse	perte de poids	Classe- ment	n° d'ana- lyse	perte de poids
1	12	0,928	13	8	0,514
2	27	0,739	14	3	0,500
3	2	0,697	15	14	0,477
4	19	0,650	16	20	0,466
5	22	0,641	17	5	0,450
6	1	0,600	18	18	0,440
7	25	0,560	19	11	0,410
8	26	0,560	20	19	0,391
9	10	0,558	21	15	0,352
10	9	0,537	22	4	0,336
11	17	0,515	23	23	0,336
12	13	0,514	24	7	0,257

La perte de poids après 240 heures d'immersion était très faible pour chaque échantillon, aussi est-il assez difficile d'établir un classement. Malgré tout, on remarque que les fontes phosphoreuses, silicieuses et manganésées ont tendance à se placer dans le groupe de tête. Les fontes grises ordinaires dans le groupe intermédiaire, et la fonte malléable ainsi que la fonte grise n° 4 dans le groupe de queue. Il est peut-être utile de signaler à l'attention la fonte n° 4 qui s'est également classée dans les dernières, lors des essais de corrosion par l'acide dilué et par l'acide à 98 %.

MICROGRAPHIES. — Nous donnons plus haut les micrographies, au grossissement 200, de quelques fontes choisies dans les divers groupes, afin de donner une idée de la structure des différentes fontes employées. Plus loin dans le chapitre relatif à la coalescence de la fonte et à la corrosion de ces fontes, nous donnons également quelques micrographies au grossissement 1.000 qui complètent les premières. Parmi celles-ci, nous pouvons signaler dès à présent, la fonte n° 3 coulée en gueuse, dont la structure était à perlite sorbitique, c'est le seul échantillon de cette espèce contenu dans le lot des 27 fontes étudiées.

Voici les observations que nous pouvons faire sur les micrographies données plus haut :

FONTE BLANCHE N° 7. — Elle est constituée par de la primausténoïde et l'eutectique des fontes. La cémentite en excès qui entoure la primausténoïde indique qu'il y a eu un retard à la solidification.

FONTE MALLEABLE N° 15. — Elle est composée de graphite en nodules, de ferrite et de perlite. Elle est plus riche en carbone dans le cœur du métal qu'à la superficie.

FONTE N° 4. — Elle représente la structure type d'une fonte grise refroidie lentement. La perlite est

nettement dessinée en lamelles et autour du graphite se trouvent des zones de ferrite.

Fonte N° 21. — C'est une fonte grise sans carbone combiné. Ses éléments sont le graphite, la ferrite et l'eutectique phosphoreux. Elle représente le type des fontes très corrodables.

Nous conviendrons de qualifier de fine la structure des fontes qui contiennent des éléments de graphite assez fins et une perlite brouillée, dans laquelle il est difficile de distinguer les lamelles de cémentite au grossissement 200. Inversement les structures dites grossières seront celles qui seront formées de graphite en feuilles épaisses et de perlite bien dessinée.

Ceci posé, on pourra se reporter aux figures ci-jointes pour avoir une idée de la structure des différents métaux essayés. Nous donnons ci-dessous un tableau qui permettra cette comparaison.

FONTES GRISES ORDINAIRES

Structure fine : N° 10, 11, 12.

Structure grossière : N° 2, 4, 5, 13, 14, 22, 23, 25.

FONTES PHOSPHOREUSES AVEC CARBONE COMBINÉ

Structure fine : n° 1, 16, 17, 18, 26.

FONTES PHOSPHOREUSES SANS CARBONE COMBINÉ

Structure fine : n° 19, 20, 21, 24, 27.

Les fontes phosphoreuses avec carbone combiné ont la même structure que les fontes ordinaires à structure fine auxquelles on aurait ajouté de l'eutectique phosphoreux dans les zones de ferrite. Enfin, la fonte 8 est une fonte blanche constituée par un mélange de cémentite et de primausténoïde. L'absence totale d'eutectique indique un retard très accusé de la solidification. La fonte n° 9 a une structure semblable à la

fonte n° 8 mais présente une quantité beaucoup moindre de cémentite.

En résumé, la corrosion des fontes est généralement plus élevée que celle des aciers, en particulier dans l'acide dilué et dans l'acide à 98 %. Les fontes de moulage, c'est-à-dire les fontes grises silicieuses, les fontes grises phosphoreuses et même les fontes ordinaires sont excessivement attaquables par l'acide sulfurique.

La corrosion est généralement plus faible dans les oléums et même dans certains cas, les fontes deviennent comparables aux aciers.

Nous avons vu précédemment que la corrosion des aciers dans l'oléum à 20 % diminuait en fonction de la teneur en carbone. Cette constatation s'accorde avec les résultats obtenus pour les fontes.

En général, lorsqu'on envisage la question corrosion par l'acide sulfurique, il y a lieu de rejeter l'emploi des fontes de moulage et de leur préférer l'acier doux pour les pièces susceptibles d'être corrodées, sauf dans le cas de l'oléum à 20 % pour des raisons que nous avons vues.

Trois fontes grises peuvent retenir notre attention pour la façon remarquable dont elles se sont comportées en présence de l'acide dilué ou de l'oléum à 20 %; ce sont des fontes 3, 4, et 5 sur lesquelles nous avons exécuté des traitements thermiques, en vue de produire la coalescence de la cémentite, phénomène qui nous le savons présente un grand intérêt dans l'étude de la corrosion.

La Coalescence de la fonte grise

Aucune étude concernant la coalescence de la fonte grise n'est venue à notre connaissance, aussi nous avons d'abord essayé d'obtenir cette transformation par recuit de longue durée à 700° comme on opère ordinairement pour les aciers. Ce moyen simple a donné des résultats très satisfaisants sur une fonte dont la perlite était brouillée, mais on a constaté que le divorce de la perlite était très lent pour les fontes dont la perlite était faite de grosses lamelles, ce qui confirme ce que l'on sait déjà pour les aciers. Mais la coalescence a été facile dans tous les cas lorsque par trempe à l'eau à 850° et revenu prolongé à 700° , on a d'abord transformé la perlite lamellaire en perlite sorbitique puis en perlite globulaire. Ce dernier traitement a été choisi après considération d'un fait connu pour les aciers, que la cémentite se réunit d'autant plus facilement en globules qu'elle était en éléments plus fins à l'origine. Les résultats obtenus sont donc d'accord avec ce que l'on sait et ils montrent que la coalescence de la perlite est très facile à obtenir dans les fontes grises.

Etude de la corrosion des fontes coalescées

Fonte N° 3. — La coalescence de cette fonte a été très facile. Déjà après une heure de recuit à 700° la perlite était divorcée, mais les globules n'étaient pas encore nettement dessinés. Après 3 heures de recuit, la coalescence est très nette et en prolongeant les recuits jusqu'à 15 heures on observe un grossissement continu des globules. On a également produit la coalescence par trempe à l'eau suivie de revenu à 700° ,

la figure ci-jointe montre le résultat obtenu par ce procédé.

Fontes N° 4 et N° 5. — Ces fontes présentaient à l'état naturel une perlite très grossière, il a donc été difficile d'obtenir la coalescence par simple recuit, et après 15 heures à 700° on observait encore quelques îlots de perlite lamellaire dans une masse de cémentite globulaire. Mais par trempe suivie de revenu il a été assez facile d'obtenir cette transformation. Les micrographies 4 et 5 montrent le changement survenu dans la structure après 20 minutes de revenu.

Enfin, avant d'aborder l'étude de la corrosion des échantillons ainsi traités, nous avons fait subir à la fonte n° 3 un recuit à 900° suivi de refroidissement lent (5° par minute) en vue d'obtenir des échantillons à perlite lamellaire et d'avoir ainsi toute la gamme des structures possibles dans la fonte.

Voici, exprimés en grammes par 24 heures au mètre carré, les résultats obtenus à l'attaque par l'acide à 2 % :

Fonte N° 3 ; Durée 72 h. ; Température moyenne : 9°

N°	1 ^{re} Période de 24 heures	2 ^{me} Période	En 72 heures	Moyennes	Traitements	Structures
1	200	275	248	216	recuit 1 h. 700°	Perlite globulaire
2	224	250	229		— 3 h. »	— —
3	169	179	167		— 9 h. »	— —
4	202	270	241		— 12 h. »	— —
5	213	214	195		— 15 h. »	— —
6	210	229	222	256	Trempés et revenus 2 h. 700	— —
7	250	308	290		— —	— —
8	314	403	360	329	Recuits à 900° et refroidis lentement.	Perlite lamellaire
9	356	333	332		— —	— —
10	260	326	294		— —	— —
11	235	391	334	418	Etat naturel	Perlite sorbitique
12	240	408	462		»	— —
13	312	518	458		»	— —

Fonte N° 3 — G = 1000
(Graphite et perlite sorbitique) (1)
Etat Naturel

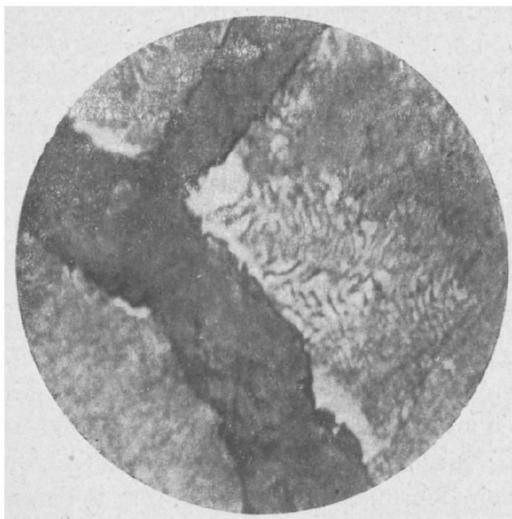


Fig. 22

Trempé à l'eau et revenu 2 heures à 700°
(graphite et perlite globulaire)

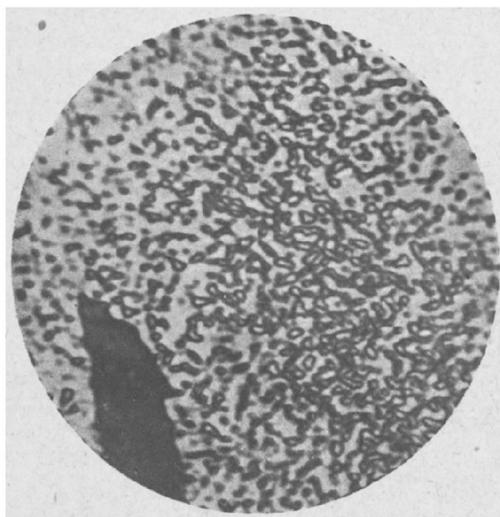


Fig. 23

(1) La figure présente quelques lamelles de perlite, nous avons micrographié cette zone pour montrer la différence entre la perlite lammellaire et la perlite sorbitique, mais dans son ensemble, la fonte n° 3 présente uniquement de la perlite sorbitique.

Fonte N° 5 — G = 1000
(graphite et perlite lamellaire)
Etat naturel

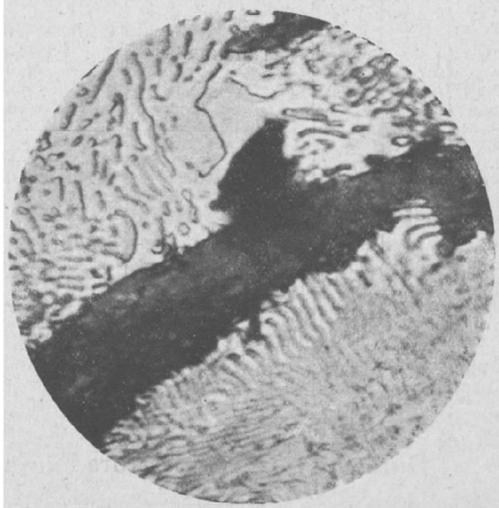


Fig. 24

Trempé à l'eau à 850° — Revenu 20 minutes à 700°
(graphite et perlite globulaire)

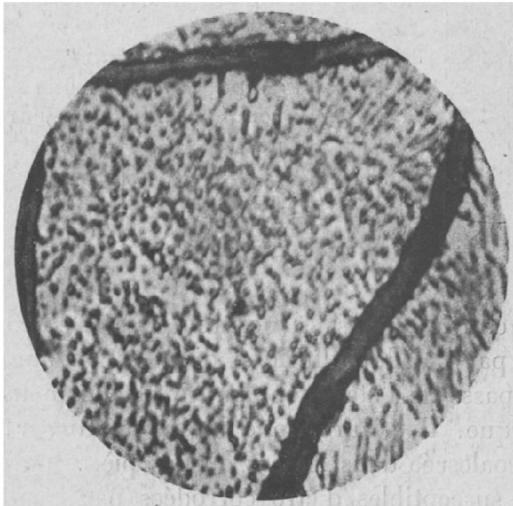


Fig. 25

Fonte N° 4 ; Durée 72 h. ; Température moyenne : 9°

N°	1 ^{ere} Période	2 ^{me} Période		Moyennes	Traitements	Structures
1	490	590	525	451	Etat naturel	Perlite lamellaire
2	347	417	378			
3	274	330	297	313	Trempe et re- venu 20 min. à 700°	Perlite globulaire en majeure partie
4	312	352	329			
5	296	299	287	301	Trempe et re- venu 2 heu- res à 700°	Perlite globulaire " "
6	288	337	316			

Fonte N° 5 ; Durée 72 h. ; Température moyenne : 9°

N°	1 ^{ere} Période	2 ^{me} Période	En 72 heures	Moyennes	Traitements	Structures
1	338	339	354	328	Naturel	Perlite lamellaire " "
2	282	312	303			
3	254	302	280	284	Trempe et re- venu 20 mi- nutes	Perlite globulaire en majeure partie
4	272	316	288			
5	215	210	208	222	Trempe et re- venu 2 heu- res.	Perlite globulaire " "
6	220	249	237			

Les chiffres ci-dessus montrent que la corrosion des fontes par l'acide sulfurique dilué va en augmentant si on passe de l'état globulaire à l'état lamellaire puis sorbitique. Il y aura donc intérêt à utiliser la fonte pure coalescée dans les cas où des pièces de fonte seraient susceptibles d'être corrodées par l'acide sulfurique dilué.

Afin de compléter ce travail, nous avons entrepris la corrosion par l'oléum à 20 % afin de nous rendre compte si la coalescence augmentait la corrosion comme dans les aciers. Les chiffres que nous avons obtenu sont les suivants :

Oléum à 20 %. — Durée 240 heures
Température moyenne : 11°

N°	F.n° 3	.n° 4	.n° 5	Structure
1	3,66	6,96	0,5	Perl. lamellaire (n° 3 recuit, 4 et 5 naturels).
2	12,3	11,4	0,8	Perl. globulaire en majeure partie.
3	14,7	14,7	1,3	Perl. globulaire (Trempe et revenu 2 heures).

Enfin, les recuits de longue durée sur la fonte n° 3 ont donné les chiffres suivants :

Etat naturel	1 h.	3 h.	9 h.	12 h.	15 h.
0,6	17,9	17,8	8,7	4,2	7,5

On constate ici une loi de corrosion inverse à celle observée dans l'acide dilué. En effet, la corrosion va en diminuant si on passe de l'état globulaire à l'état lamellaire puis sorbitique. En outre, on remarque dans les résultats obtenus sur les éprouvettes de la fonte n° 3 qui ont subi des recuits de longue durée à 700°, que la corrosion atteint un maximum pour 1 à 3 heures de recuit, puis redescend ensuite. Peut-être y a-t-il là un effet du phénomène d'oxydation du graphite qui vient compliquer la chose.

Cette dernière étude constitue un sérieux complément à notre travail sur la corrosion des fontes. Puisse-t-elle attirer l'attention sur l'importance de la structure dans les recherches sur la corrosion et servir à ceux que la question intéresse.

RÉSUMÉ

Cette thèse comprend deux parties. D'une part, l'étude des aciers étirés à froid ayant subi dans les ateliers de la Société Anonyme d'Escaut et Meuse, des étirages et recuits successifs à 700°, d'autre part, l'étude comparée de la corrosion des fontes qui prolonge celle déjà faite sur les aciers au point de vue particulier sur la corrosion par l'acide sulfurique à divers degrés de concentration.

La première partie comprend l'étude de la résistance à la traction, à la corrosion, au choc sur barreaux entaillés et enfin les essais de dureté qui complètent les résultats obtenus à la traction. Nous avons tracé les courbes de résistance à la traction et les courbes d'allongement et nous avons constaté, ce qui était à prévoir, une chute de la résistance à 700° à laquelle correspondait une augmentation de l'allongement. Les courbes de dureté établies ensuite, présentaient la même allure générale que les courbes de résistance à la traction. En outre, les courbes de corrosion dans l'acide dilué ont montré un minimum à 700° et une augmentation de la corrosion en fonction de la teneur en carbone ; par contre, dans l'oléum à 20 %, on a obtenu des résultats tout à fait inverses. Ce travail sur les aciers a été terminé par l'étude de la fragilité. Pour les aciers doux, on a obtenu un minimum entre 300 et 400° et un maximum au voisinage de 900 et 1000°, mais les aciers demi-durs ont donné des résultats assez inattendus. En effet, tandis que l'on admet ordinairement que la coalescence diminue la résilience, on a obtenu un maximum à 700°. Or, l'effet des étirages et recuits successifs à 700° est de coalescer la cémentite, mais il faut signaler que dans le cas présent ce phénomène a été provoqué par des recuits ra-

pides succédant aux écrouissages, tandis que dans la plupart des cas étudiés il a été produit par des recuits prolongés. Peut-être faut-il voir là une explication de cette contradiction avec les résultats obtenus par d'autres.

L'étude précédente porte en somme sur deux phénomènes : l'écrouissage, la coalescence. Nous avons vu que ce dernier avait une influence marquée sur la corrosion et nous avons voulu faire un rapprochement entre les aciers et les fontes. Nous avons donc commencé par étudier un grand nombre de fontes diverses en vue de faire une sélection ; après quoi nous avons produit sur certaines d'entre elles le phénomène de la coalescence. Ces fontes étudiées à la corrosion ont confirmé les résultats obtenus pour les aciers.

Il nous reste, avant de terminer, à souligner l'intérêt pratique de l'étude des propriétés mécaniques des aciers ayant subi des étirages à froid et recuits successifs. Nous nous sommes, en effet, placé sur le terrain de la pratique industrielle en opérant des recuits intermédiaires rapides et à basse température, après quoi, nous avons cherché le recuit final à adopter en vue de rendre au métal ses propriétés normales. Les chiffres que nous avons donné à ce sujet peuvent être d'une application journalière chez les étireurs au banc.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

- P. GOERENS. — Influence de l'écroissage sur les propriétés de l'acier. (*Revue de Métallurgie*, Mai 1913).
- LÉON GUILLET. — Recherches sur le recuit des produits écrouis (*Revue de Métallurgie*, Mai 1913).
- HANEMANN et Ch. LIND. — Modifications des matériaux par le laminage à froid (*Revue de Métallurgie*, Janvier 1914).
- P. GOERENS. — Influence du recuit sur les propriétés de l'acier doux écroui (*Stahl und Eisen*, Février 1914).
- POMP. — Traitement thermique critique des aciers doux à faible teneur en carbone soumis au préalable à des déformations critiques à froid. (*Stahl und Eisen*, 1920, p. 1261-«269, 1366-1378, 1403-1415).
- PORTEVIN et BERNARD. — Contribution à l'étude de la coalescence de la cémentite dans les aciers et ses conséquences industrielles. (*Revue de Métallurgie*, Novembre 1921).
- Lieutenant-Colonel d'Artillerie GRARD. — L'acier BERGER-LEVRAULT, éditeurs, Paris.
- Léon GUILLET et Albert PORTEVIN. — Précis de Métallographie microscopique et de Macrographie — DUNOD et PINAT, Editeurs.
- Henry Marion HOWE. — Métallographie de l'acier et de la fonte — Traduit par Octave HOCK, Ingénieur A. I. Lg. VAILLANT et CARMANNE, éditeurs, Liège.
-

SECONDE THESE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

La structure des métaux ferreux, Les Défauts de l'acier.

Cette étude non imprimée a été tirée à la polycopie en plusieurs exemplaires qui ont été distribués à Messieurs les Membres du Jury et à Monsieur le Doyen de la faculté des Sciences de l'Université de Lille.

VU ET APPROUVÉ

Lille, le 1^{er} Février 1926

Le Doyen de la Faculté des Sciences :
A. MAIGE

VU ET PERMIS D'IMPRIMER

Lille, le 5 février 1926

Le Recteur de l'Académie de Lille :
A. CHATELET