

NOTE

LES ACIERS DE QUALITÉ.

Leur fabrication
dans les aciéries spéciales de la Ruhr

PAR

L. J. TISON

Ingénieur des Ponts et Chaussées,
ex-chef du groupe de Dusseldorf de la M. I. C. U. M.

(Suite) (1).

CHAPITRE II. — ETUDE SPECIALE DES ACIERS.

I. — Aciers de construction.

A. — Aciers pour la construction mécanique.
(automobiles, turbines, électrotechnique, machines en général).

On pourrait diviser ces aciers, comme le font d'ailleurs les grandes aciéries, en :

- 1) Aciers de cémentation pour pièces dont la surface doit être très dure pour résister à l'usure, et le noyau, sans fragilité;
- 2) Aciers dont on demande de bonnes caractéristiques mécaniques que l'on améliore encore par le traitement thermique.

Certains aciers, appelés par les aciéries « universels », sont indifféremment employés pour la cémentation ou à l'état amélioré par le traitement thermique.

Au point de vue de la composition, ces aciers ne diffèrent d'ailleurs entre eux que par la teneur en C, laquelle ne dépasse guère 0,12 % pour les aciers de cémentation, alors qu'elle va de 0,20 à 0,45 pour les autres.

Si on laisse de côté les aciers au C, dont il a été parlé au chapitre des fours Martin, les aciers utilisés pour la construction mécanique sont soit au Ni, soit au Ni-Cr, soit encore comme ersatz, des aciers au Mn ou au Mn-Si.

(1) Voir *Annales des Mines de Belgique*, tome XXVII, 1926, 2^e liv.

Aciers au Ni.

Les aciers utilisés sont généralement perlitiques (fig. 11).

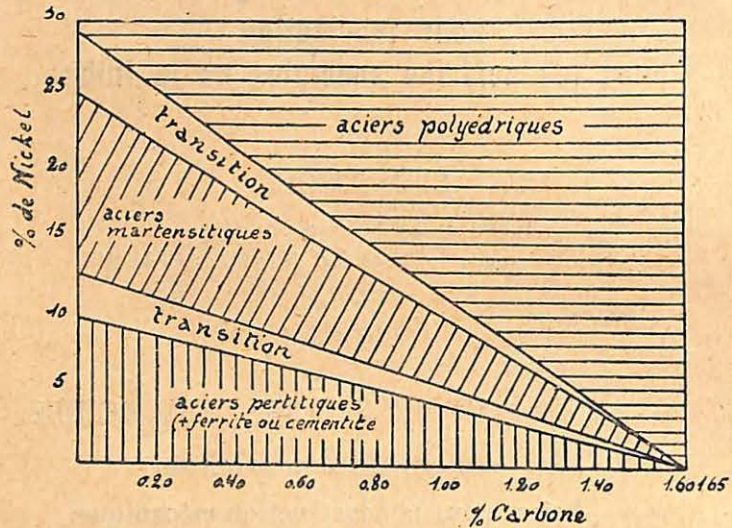


Fig 11 DIAGRAMME DES ACIERS AU NICKEL D'APRES GUILLET

Le grand avantage de ces aciers est de présenter une ductibilité très grande, tout en ayant une bonne résistance (voir fig. 12).

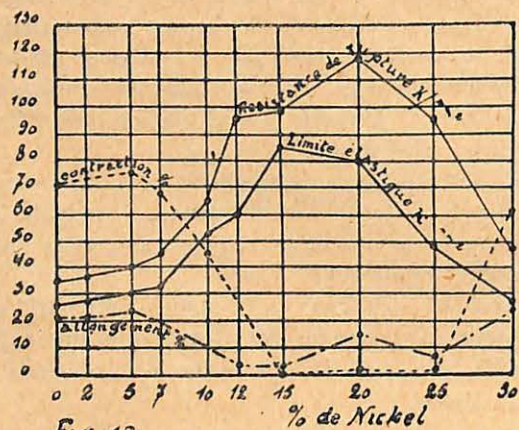


Fig. 12

La teneur en Ni varie de 1 à 6 et même 8 %. Après 8 %, la résistance au choc tombe rapidement (fig. 13), l'acier devenant martensitique.

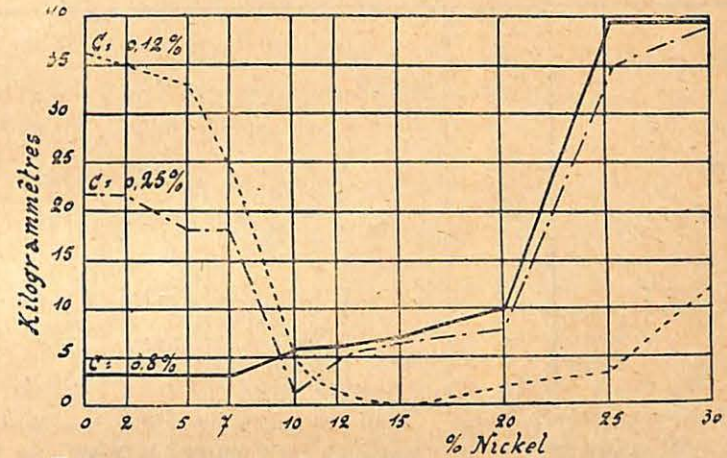


Fig 13 RESILIENCE (Méthode Fremont) DES ACIERS AU NICKEL FORGÉS - D'APRES GUILLET

Les tableaux ci-après donnent, avec les caractéristiques de ces aciers, quelques exemples d'utilisation.

1) ACIERS A CÉMENTER.

UTILISATION	C %	Ni %	Etat	Limite élastique	Charge de rupture	Allongement
Tubes, rivets, tôles, pièces de machines et d'autos.	0,05	2	(recuit)	25-30	40-45	30-25
			(trempé; essai sur noyau)	50-60	70-80	15-10
	à	2,5-3,5	(recuit)	28-32	45-55	25-22
			(trempé; essai sur noyau)	—	80-90	10-14
Roues dentées, arbres à cames etc.	0,15	4-6	(recuit)	35-45	55-65	25-20
			(trempé; essai sur noyau)	—	90-100	—
		7-8	(recuit)	40-45	60-70	25-18

2) ACIERS A AMÉLIORER PAR TRAITEMENT THERMIQUE.

UTILISATION	C %	Ni %	Etat	Ltmite élastique	Charge de rupture	Allongement
Tubes, rivets, tôles, ville-brequins	0,20	1,5-3,5	(recuit)	35-40	60-70	18-14
			(fortement revenu)	35-50	60-75	16-12
Axes de transmission.	à		(faiblement revenu)	65-75	75-85	12-8
Roues dentées.			(recuit)	40-45	70-75	16-12
Tourbillons. etc., etc.	0,45	3-4	(fortement revenu)	45-55	75-95	12-8
			(faiblement revenu)	65-75	85-95	10-6
		4-6	(recuit)	45-50	75-85	15-12
			(fortement revenu)	50-55	85-95	12-8
			(faiblement revenu)	65-75	95-110	10-6

Traitement thermique. — Pour les aciers jusqu'à 3 à 4 % de Ni, l'action du traitement thermique est comparable à celle qu'il produit sur des aciers au C (fig. 14). Mais, particulièrement au-

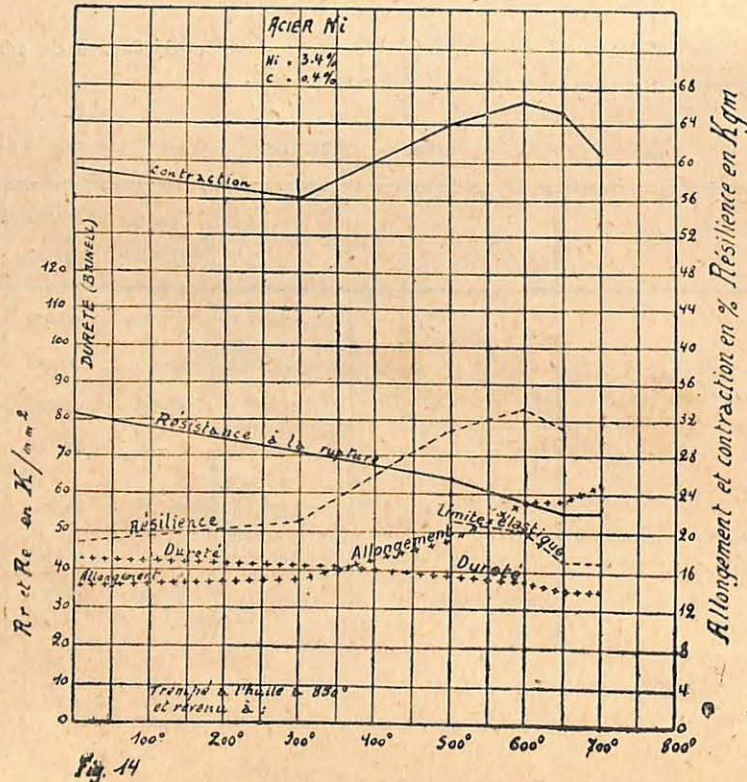


Fig. 14

dessus de 6 % de Ni, l'hystérésis apparaît et le recuit devient une trempe. On peut obtenir l'état doux par revenu à température inférieure au point de transformation (400 à 600°).

Aciers au Cr Ni (Fig. 15).

Le Cr diminue dans ces aciers la ductibilité qu'y apporte le Ni. Par contre, la dureté et la résistance augmentent avec la teneur en Cr.

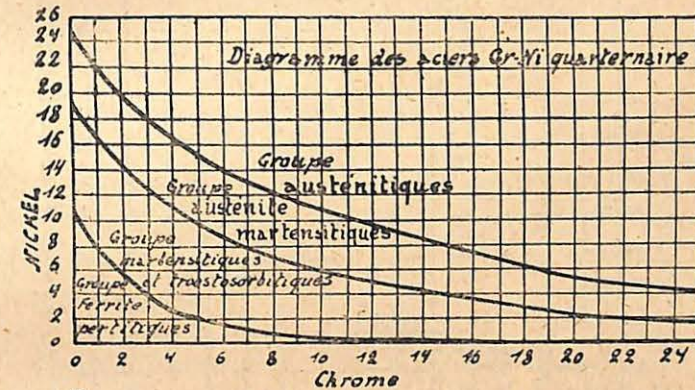


Fig 15 DIAGRAMME DES ACIERS Cr-Ni à FAIBLE TENEUR DE CARBONE (D'APRÈS STRAUSS ET MAURÉ)

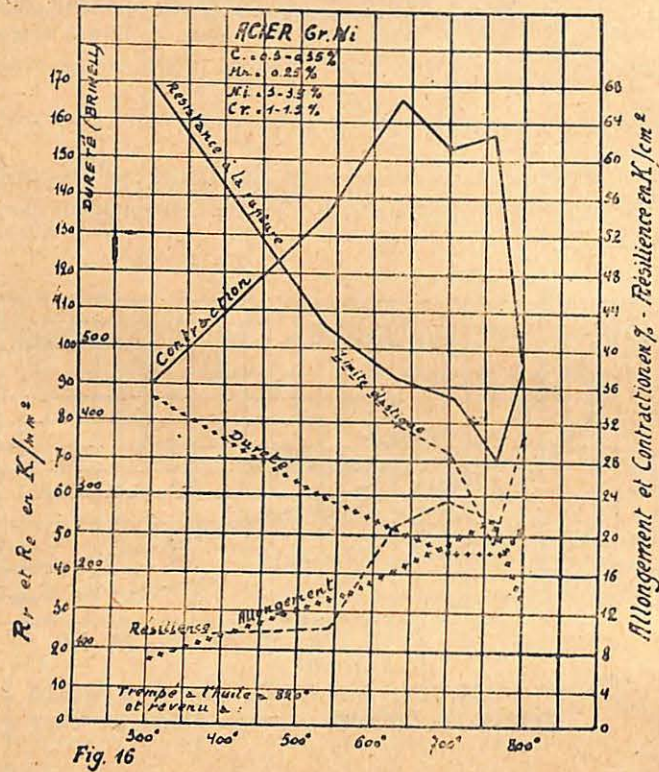
La plupart des aciéries ajoutent généralement un peu de Vn (0,5 à 1 %) à ces aciers, Vn qui agit non seulement par ses propriétés désoxydantes, mais qui augmente aussi la résistance du métal sans affecter sa ductibilité.

Ci-dessous quelques compositions de ces aciers avec leurs caractéristiques :

- 1) Ni Cr mi-dur. Rr ≥ 90 ; Re ≥ 70 ; A = 12 ; ρ (résilience) = 13.
C = 0,28 à 0,35 % ; Mn = 0,4 % ; Si = 0,2 à 0,3 %.
Ni = 2,5 à 2,8 % ; Cr = 0,7 %.

Traitement thermique : Trempe à l'huile à 820° ;
Revenu à 650° (fig. 16).

- 2) Ni Cr dur. Rr ≥ 90 ; Re ≥ 75 ; A = 12 ; ρ = 12.
C = 0,3 à 0,35 % ; Mn = 0,25 % ; Ni = 3 à 3,5 %.
Cr = 1 à 1,5 % (fig. 17).



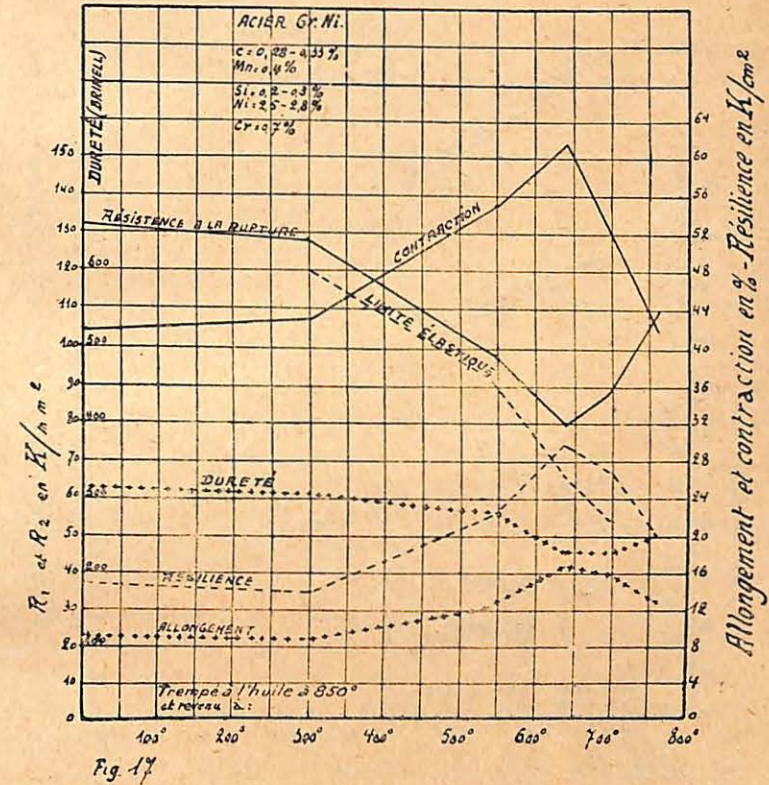
Traitement thermique : Trempe à l'huile à 800° à 850° ;
Revenu à 650°.

3) Ni Cr. Trempant à l'air. Trempe à l'air à 900°.

Br ≥ 165 ; Re ≥ 140 ; A = 5,5 ; ρ = 6.
C = 0,25 à 0,4 % ; Mn = 0,4 à 0,6 ; Ni = 3,5 à 5 %.
Cr = 1,5 à 2 %.

Les mêmes aciers, mais à teneur en C < 0,12 % existent comme aciers de cémentation.

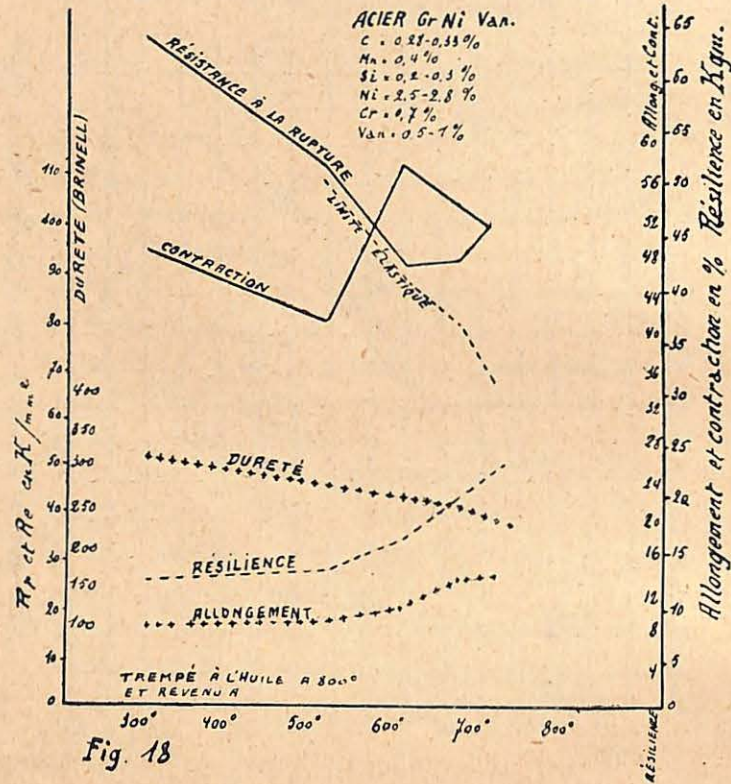
L'acier 2) est à comparer avec l'acier dont les caractéristiques sont données par la fig. 18. Ces deux aciers ont sensiblement mêmes teneurs en Cr, Ni et C, mais on a ajouté à celui qui fait l'objet de la fig. 18, 0,5 à 1 % de Vn.



Contrairement à ce qui a été fait aux Etats-Unis où l'on a standardisé la fabrication des aciers spéciaux, particulièrement pour la construction automobile, en se bornant à la fabrication de quelques aciers de compositions aussi constantes que possible, les constructeurs et les aciéristes allemands n'ont pas voulu s'en tenir à la rigidité de ce système qu'ils accusent, non sans raison, de s'opposer à tout progrès.

Pour les aciers au Ni et au Cr-Ni cependant, sans s'en tenir à la rigueur du standard américain, on peut dès maintenant reconnaître un certain nombre d'aciers-types mieux étudiés, entre lesquels les aciéries intercaleront les combinaisons que les exigences des clients réclameront.

Les compositions ci-dessus sont celles d'aciers qui répondent assez bien à ces aciers que l'on retrouve dans les catalogues de toutes les aciéries.



Aciers au Wo-Ni.

Aux aciers au Cr-Ni se rattachent les aciers au Wo-Ni, d'ailleurs beaucoup moins fréquents que les précédents. Ils ont cependant l'avantage, après trempe, de présenter à la fois une haute résistance et une bonne ductibilité.

Becker fabrique parfois des aciers au Ni-Wo-Vn assez analogues à ses aciers au Ni-Cr-Vn (fig. 19).

Rheinmetall fait un acier au Ni-Wo pour aubes de turbines (5 % Ni; 1,5 à 2 % Wo).

Enfin, signalons que Krupp produit un acier au Cr-Wo-Ni qui, trempé et revenu à environ 650°, donne une $R_r \geq 120$ K/mm² tout en conservant un allongement de 10 %.

Acier au Mn-Si.

La plupart des aciéries produisent comme ersatz des aciers au C-Ni, un acier au Mn-Si dont la composition est assez sensiblement la suivante :

0,20 à 0,40 de C,
 0,2 à 0,3 de Si,
 1,5 à 1,8 de Mn.

A la plus faible teneur en C correspond une R_r de 0 à 70 k/mm².
 A la plus forte teneur en C correspond une R_r de 70 à 90 k/mm².

Fabrication (Cr-Ni).

Elle se fait généralement au four Martin où le Ni est ajouté soit sous forme métallique, soit sous forme de riblons.

Dans le cas d'emploi de riblons au Ni, on n'utilise que des fontes peu phosphoreuses, afin d'éviter les décarbages occasionnant toujours de fortes pertes en Ni.

Ces aciers se fabriquent comme les aciers ordinaires. Le Ni complémentaire n'est ajouté qu'après désoxydation complète. On compte sur un rendement en Ni de 90 %.

Le ferro-chrome est ajouté ensuite. Pour protéger le Cr contre l'oxydation, on peut ajouter du charbon de bois. Le rendement en Cr est de 80 %.

L'addition recarburante finale se fait par le ferro-manganèse.

Cependant, dans le cas où les teneurs des divers éléments ou des conditions spéciales de résistance sont imposées, on opère plutôt comme suit : On réalise d'abord rapidement un acier au C doux toujours le même et facilement reconnaissable à l'analyse. La décarburation étant terminée, on procède au décarbage, puis on ajoute les différents ferros qui recarburent le bain et y introduisent les éléments désirés. Les additions sont calculées de façon à donner au produit final la composition désirée.

Traitement thermique.

1. ACIERS DE CÉMENTATION.

a) *Cémentation.* — Les parties de la pièce destinées à rester douces sont protégées par une couche d'argile ou d'amiante. Les pièces sont alors empaquetées dans des caisses ou tubes hermé-

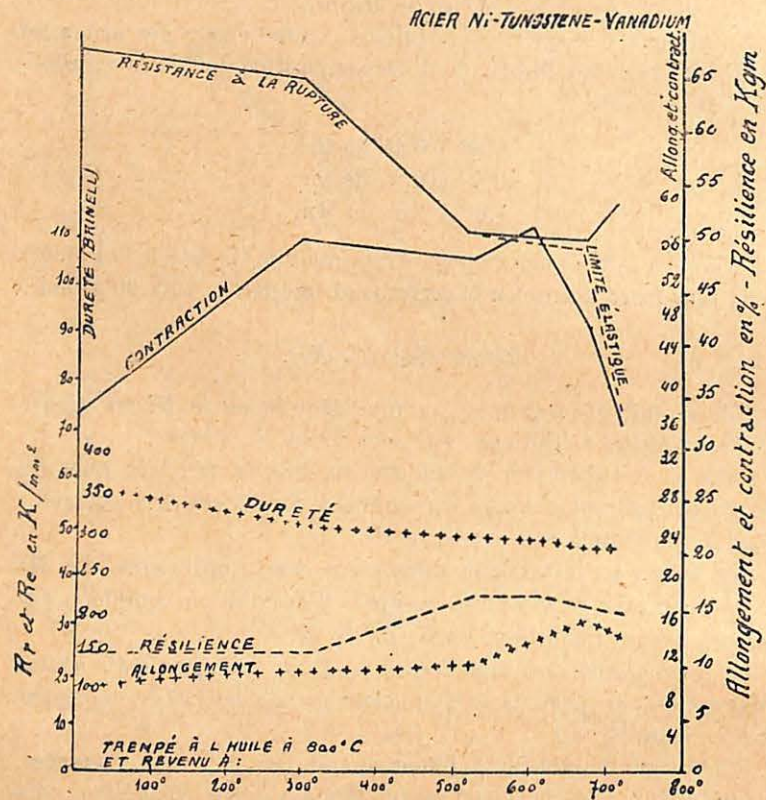


fig 19

tiquement clos avec un ciment constitué par des cendres de cuir pulvérisé ou un mélange intime de charbon de bois (3) et de carbonate de baryum (1). Pour économiser le ciment, on peut utiliser la poudre qui a déjà servi pour les couches extérieures, tandis que les pièces d'acier seront toujours entourées d'une couche de poudre nouvelle épaisse de deux doigts (voir croquis fig. 20).

Les paquets ainsi constitués sont chauffés dans un four à 850-880°; cette température est maintenue pendant 2 ou 3 heures suivant la profondeur de cémentation qu'on veut obtenir.

Pour les roues dentées et autres pièces à parois minces, il est bon de ne pas dépasser 1/2 à 3/4 millimètre. Le tableau ci-dessous

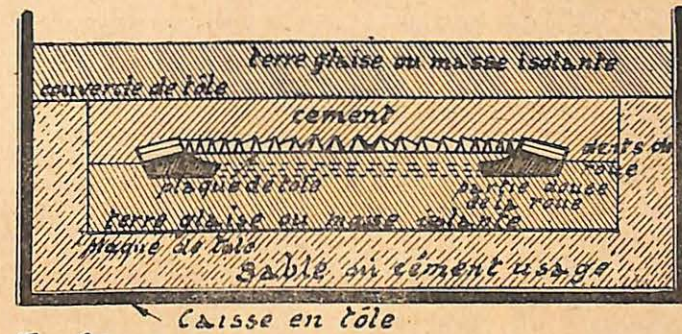


Fig 20.

donne une idée de l'épaisseur de la couche cimentée pour diverses durées de séjour dans le four.

Durée de séjour dans le four à 850-880°	Profondeur de cémentation pour aciers au C	Aciers alliés
1/2 h.	0,3	0,2
1 h.	0,5	0,3 - 0,4
2 h.	0,7 - 0,8	0,5
4 h.	1	0,6 - 0,7
8 h.	1,2 - 1,4	0,8 - 0,9
12 h.	1,5 - 1,6	1 - 1,1

b) *Recuit intermédiaire.* — Après cette carburation superficielle, les pièces sont chauffées empaquetées dans la poudre ayant déjà servi ou bien sans poudre, dans un four à moufle à une température de 650°, afin de faire disparaître les tensions que le traitement précédent a pu introduire (Becker). Le Rheinmetall les porte à 800-850° et les laisse refroidir 7 à 8 heures dans les fours.

Böhler remplace ce traitement par une trempe dans l'huile de navette froide (température d'échauffement : 840°).

Mars, qui préconise aussi cette trempe, explique qu'elle a pour but d'améliorer le noyau. La trempe ne provoque, en effet, la formation que d'une couche superficielle de martensite (au moins pour les objets d'un certain volume). A l'intérieur, où la vitesse

de refroidissement a progressivement diminué, on trouve successivement les différents intermédiaires entre la martensite et la perlite, constituants qui sont précisément ceux que l'on obtient dans les aciers dits améliorés par trempe suivie de revenu.

c) *Trempe*. — On porte ensuite les pièces à une température variant de 750 à 800° (température de trempe d'aciers fortement carburés), puis on trempe soit à l'eau, soit à l'huile.

d) *Revenu*. — Pour obtenir une plus grande ténacité, on peut faire revenir en tenant la pièce plusieurs heures dans l'eau bouillante ou l'huile chaude (100 à 200°).

2. ACIERS AMÉLIORÉS.

L'amélioration consiste en :

a) une trempe à environ 800 à 850° et même moins dans l'huile ;

b) un revenu qui est généralement de 600 à 650°.

Pour les aciers au Cr-Ni (Cr 1 à 1,5; Ni 3 à 3,5), même non traités, la résistance est déjà très grande.

On adopte plusieurs températures de revenu :

à 300-400° pour les roues dentées ;

à 500-600° pour les pièces soumises à la torsion et à la flexion (villebrequins) ;

à 650-700° pour les mêmes pièces, mais travaillant dans des conditions très défavorables.

3. ACIERS TREMPANT A L'AIR.

Peu de choses à en signaler, sinon que l'état doux est obtenu par revenu de 3 ou 4 heures à 500-600° avec refroidissement sous la cendre.

B. — Aciers pour la construction métalliques.

On en est toujours dans ce domaine à l'emploi presque général des aciers auxquels nous avons réservé le nom d'ordinaires. Toutefois, divers essais d'utilisation d'aciers au Ni ont été faits. On peut citer comme exemple le pont de chemin de fer Oberhausen-Dorsten construit par la G. H. H. L'acier contient de 2 à 2,5 % de Ni avec les caractéristiques suivantes :

Rr 56-65 k/mm², Re 35 k/mm², A = 18 %.

Le pont ne pèse que 60 % du poids qu'il aurait atteint si on l'avait construit en métal ordinaire. De plus, cet acier au Ni est moins sensible à l'action de l'air et de l'humidité.

C. — Aciers pour constructions spéciales.

1. — Aciers utilisés pour leurs propriétés électriques ou magnétiques.

a) ACIERS POUR AIMANTS.

Conditions exigées. — Un acier pour aimant permanent doit avoir, d'une part, une capacité de saturation et une perméabilité aussi élevées que possible, et, d'autre part, une rémanence et une force coercitive également très grandes.

Les premières conditions sont d'autant mieux réalisées que le métal contient plus de fer libre, les autres corps étant toujours moins magnétiques que lui. L'acier devrait donc être doux. Par contre, l'orientation des aimants moléculaires provoquée par le courant disparaît aussi facilement qu'elle se réalise dans ces fers doux et, si l'on veut satisfaire aux secondes conditions, il faut employer un acier où le magnétisme soit « figé » par la rigidité, par la dureté.

La rigidité donnée par la structure martensitique (solution solide) est à éviter, car le fer y étant en solution, donc à l'état non libre, les premières exigences ne sont pas réalisées. La structure ultra-microscopique de l'osmondite est celle qu'il faut s'efforcer d'obtenir. Le fer n'y est plus dissous et les particules de cémentite y sont à l'état fortement divisé, favorable à l'obtention d'une grande dureté (voir théorie de la trempe de Le Châtelier).

La courbe ci-dessous montre la variation du pouvoir magnétique avec la structure de l'acier (fig. 21).

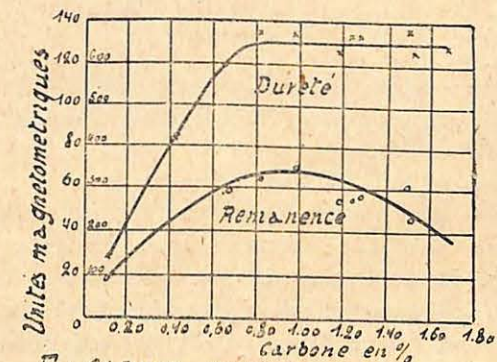


Fig. 21 DURETÉ ET RÉMANENCE DES ACIERS AU CARBONE

Composition. — α) Le moyen le moins coûteux de donner cette dureté est d'augmenter la proportion de C de l'acier. Mais cette dureté n'est obtenue qu'aux dépens d'une formation de cémentite Fe_3C , peu magnétique. Ainsi, un acier à 1 % de C ne contient que 85 % de fer libre, magnétique. Les formules suivantes donnent la variation de la force coercitive k et de la saturation J avec teneur p en C de l'acier :

$$k = 0,7 + 7,5 p;$$

$$4 \pi J \text{ max.} = 21620 - 1580 p \text{ (} p \text{ compris entre 0 et 0,96 \% C);}$$

$$4 \pi J \text{ max.} = 20100 - 930 p \text{ (} p > 0,96 \% C).$$

Il faut donc donner aux aciers au C pour aimants, une teneur en C moyenne. On s'en tient aux environs de 1 %. On produit d'ailleurs peu de ces aimants.

β) On s'est efforcé d'obtenir la dureté nécessaire aux aciers à aimants en réduisant la proportion de F_3C .

On y est arrivé en introduisant le Cr ou le Wo.

Les aciers ainsi constitués sont à carbure double, plus durs que l'acier au C. Ils contiennent une moindre proportion de C et, de plus, une partie seulement du C forme la cémentite, l'autre se combinant au métal choisi (Cr ou Wo) sous forme de Cr_3C_2 ou W_2C . C'est ainsi qu'un acier à 0,57 % C et 5,47 % Wo ne contient que 11,5 % de composants peu magnétiques, alors qu'un acier à 1 % de C en compte 14,55 %.

Ces aciers au Cr ou au Wo } contenant une moindre proportion
d'éléments peu magnétiques,
étant beaucoup plus durs,
constituent de meilleurs aimants permanents.

Les meilleurs aimants, de l'avis presque général des fabricants, sont ceux en acier au Wo (0,6 à 0,65 % C et 5 à 6 % Wo) (Böhler, Krefelder St).

On fait aussi des aciers à moindre teneur en Wo (2 à 3,5 %). Leur pouvoir magnétique est légèrement inférieur et se conserve un peu moins bien que les précédents. Beaucoup d'aciéries (Glockenst) ne dépassent pas 3,5 % de Wo.

Les usines fabriquant des aciers pour aimants au Cr se contentent généralement (étant donné qu'elles les considèrent souvent comme étant de seconde qualité) de produire des aciers peu chro-

més (1 à 1,1 % de C et 1,3 à 1,8 % Cr). C'est le cas de Böhler, Schmidt (Hagen), Vereinigste Edelst, Krupp).

Toutefois, Becker, Rudolf Schmidt, Bleckmann fabriquent un acier à plus haute teneur en Cr (3 à 3,5 % Cr) qu'ils jugent comparable à l'acier à 5 à 6 % de Wo.

On essaye aussi actuellement des aciers au Co à très haute teneur (jusque 25 %). Ces aciers donneraient des aimants dépassant en qualité ceux produits jusqu'à ce jour, mais leur prix excessif empêcherait leur emploi.

Traitement thermique.

Forgeage. — Entre 800 et 950°, en s'en tenant si possible aux températures inférieures. On évite aussi le chauffage lent qui accroît le grain, diminue la rigidité et, par suite, la rémanence.

Recuit. — Les aimants sont parfois recuits (à 650-700°) après forgeage, pour faire disparaître les tensions. Böhler n'admet pas ce recuit, pour la même raison que ci-dessus. Glockenst reçoit les aimants après forge, encore rouges, dans une sorte de petit puits où ils sont maintenus à cette température pendant quelque temps. On ne dépasse pas 1/2 heure. Les aciers au Cr et au Wo ayant une tendance à prendre la trempe par le refroidissement à l'air, — ils sont, en effet, à la limite des aciers martensitiques, — il est bon de laisser refroidir les aimants cintrés ou recuits dans du charbon de bois, de façon à permettre l'usinage.

Trempe. — Après usinage, les aimants sont chauffés : ceux à haute teneur en Wo, à 910-930°; les autres, à 780-800°. Ils sont alors trempés à l'eau contenant 5 à 7 % de sel ou à l'huile. S'il y a trop de déchets (ce qui se produit surtout pour les aciers au Cr), on abaisse la température de la trempe.

Revenu. — Les variations de température et les chocs occasionnent avec le temps une perte de magnétisme que l'on prévient en portant les aimants après trempe à une température de 60° pendant un temps assez long.

b) ACIERS POUR TÔLES DE TRANSFORMATEURS ET DE DYNAMOS.

Ces aciers doivent avoir, comme les aciers pour aimants, une capacité de saturation et une perméabilité aussi élevée que possible. Mais, à l'inverse des derniers, la force coercitive et la rémanence doivent être réduites le plus qu'on pourra, de façon à diminuer les pertes par hystérésis.

Aciers au C.

La force coercitive et la capacité de saturation sont données en fonction de la teneur en C par les formules ci-dessus. D'après ce qui a été dit sur les aciers pour aimants, les propriétés magnétiques d'un acier sont propres au fer qu'il contient et le C a, à ce sujet, une action particulièrement défavorable (voir aux aciers pour aimants).

Les tôles pour dynamos seront donc aussi douces que possible.

Traitement thermique. — Ces tôles sont toujours recuites avant emploi. On a cru longtemps que l'accroissement du grain causé par le recuit était la raison de l'amélioration des propriétés magnétique de ces aciers. Les expériences de Gumlich ont montré que cette amélioration provenait de l'expulsion de l'oxygène existant dans la tôle, oxygène qui s'unissait au C de l'acier et s'échappait sous forme de CO et de CO₂. La diminution de teneur en O et en C agissant dans le même sens, on voit l'influence considérable du recuit.

Gumlich a, en effet, montré que lorsque tout l'oxygène s'était échappé, tout recuit ultérieur ne faisait que diminuer les propriétés magnétiques de la tôle.

L'expérience a prouvé que la température de recuit la plus favorable était 785°, que sa durée devait être d'environ 24 heures et que le refroidissement devait se faire à raison d'une chute de 250° par heure.

Le coefficient de perte par hystérésis varie de 0,0025 à 0,005 pour ces tôles très douces à l'état naturel. Pour les tôles recuites, ce coefficient tombe à 0,00115 à 0,00156 (pour B = 17.000).

Acier au Si.

Le Si agit directement comme tout corps étranger et diminue donc les propriétés magnétiques. Mais le Si possède la propriété de provoquer la séparation de C (dissous dans la martensite ou combiné dans la cémentite) sous forme de graphite.

La raison de la formation de graphite ne peut être cherchée que dans la plus grande affinité du Fe pour le Si que pour le C (formation de Fe Si).

Or, sous cet état, le C a une action bien moins défavorable, le fer qui lui était combiné et qui devenait par le fait non magnétique étant dès lors rendu à l'état libre, magnétique.

$$\text{Aussi } 4 \pi J \text{ max.} = 21.600 - 480 p.$$

Les courbes ci-contre donnent les variations de la perméabilité de la rémanence et des pertes par hystérésis en fonction de la teneur en Si (fig. 22).

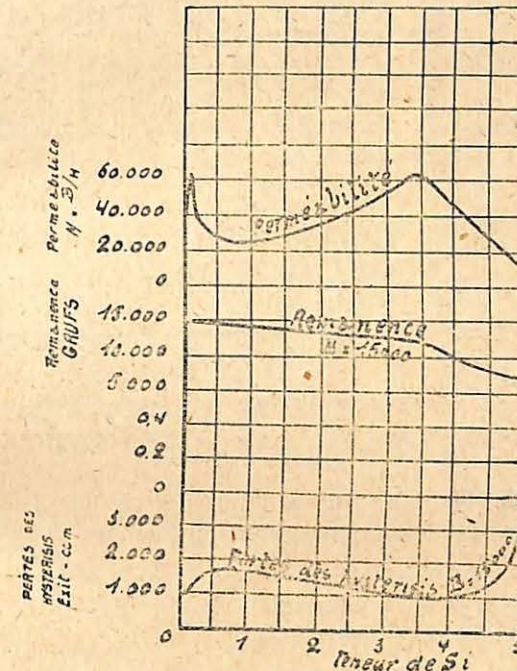


Fig. 22.

Leur examen, auquel nous joignons la conclusion pratique de plus haut montre en suffisance les raisons du choix des aciers de 3,5 à 4 % de Si pour les tôles de transformateurs et de dynamos. Pratiquement, on admet que pour atteindre avec sécurité la formation de graphite, il faut de 3 à 4 % de Si.

Le coefficient pour les tôles au Si après recuit peut tomber à 0,0008 (pour B = 15.000).

c) ACIERS NON MAGNÉTIQUES.

Ce sont des aciers à environ 0,3 à 0,5 % C et 25 % de Ni à la limite des aciers martensitiques et austénitiques (fig. 23).

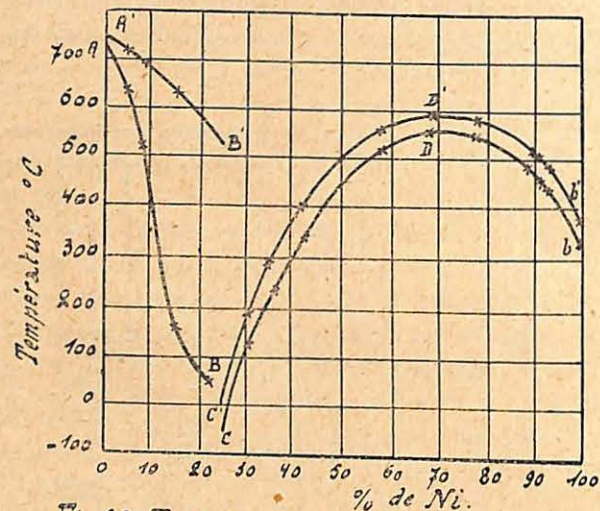


Fig 23. TRANSFORMATION MAGNÉTIQUE DES ACIERS AU NI D'APRÈS OSMOND

La figure 22 donne le diagramme de la variation de la température de transformation magnétique, en fonction de la teneur en Ni.

A' B' C' D' b' à l'échauffement.

AB CD b au refroidissement.

Le non-magnétisme de l'acier est dû à la formation de la variété allotropique β du fer. Dans les aciers au C, le fer β ne se forme qu'aux environs de 700°.

Ces aciers au Ni redeviennent magnétiques réversibles à la température de la neige de CO₂.

Ils sont magnétiques irréversibles à la température de l'air liquide. La cristallisation provoquée par ce dernier refroidissement est plus forte que celle produite par le premier et l'acier demande par suite un échauffement à température plus élevée pour redevenir non-magnétique.

Le recuit, la trempe et le travail à froid provoquent aussi la réapparition du magnétisme : l'état non-magnétique n'est qu'une situation instable que ces divers traitements font cesser.

Les propriétés non-magnétiques de ces aciers sont utilisées dans la construction des navires, pour les pièces dans le voisinage des

compas; pour certains appareils électriques, etc. Ces aciers sont fabriqués avec pareille teneur en Ni par la plupart des aciéries spéciales.

d) ACIERS POUR RÉSISTANCES ÉLECTRIQUES ET FILAMENTS DE LAMPES INCANDESCENCE.

La résistance électrique des aciers au Ni augmente avec la teneur en Ni jusqu'à environ 35 % Ni.

Les aciers fabriqués dans le but de servir de résistance sont généralement à 25-28 % de Ni avec 0,30 à 0,50 % de C.

L'augmentation de la résistance pour des teneurs plus élevées n'est pas jugée suffisante pour l'accroissement de prix qui en résulte.

Un acier de 0,15 % C et 46 % Ni est produit comme « ersatz » du platine pour la fabrication des filaments de lampes à incandescence. (Le coefficient de dilatation de cet alliage est identique à celui du platine.)

2. — Aciers pour ressorts.

Qualités requises. — Ces aciers devront avoir une limite élastique aussi élevée que possible. Par contre, ils devront avoir une résilience suffisante, au moins pour les ressorts soumis aux chocs (ressorts d'automobile et de wagons).

Il faudra donc de nouveau chercher un compromis entre R_r, R_e et A. ρ , le premier groupe ayant cependant ici une prépondérance marquée.

Composition. — On fera appel aux agents qui donnent la dureté et par suite une grande limite élastique.

1) En premier lieu, le C. Les aciers au C pour ressorts seront toujours à teneur élevée (relativement, car il s'agit d'un acier de construction). Un acier pour ressorts contiendra au moins 0,7 % C et pour les fils pour ressorts on aura même des teneurs allant de 1 à 1,3 % C. Il est vrai que les teneurs en Si et Mn seront alors limitées respectivement à 0,2 et 0,3 %.

2) Généralement, on ne se contente pas de la dureté donnée par le C et on ajoutera à l'acier un des éléments Si, Mn, Cr ou une combinaison de ces corps. À remarquer aussi que tous ces corps favorisent la pénétration de la trempe.

a) *Aciers au Cr Si* : Ces deux éléments agissent dans le même sens : augmentation de la dureté (et par suite de R_e R_r) et diminution de ρ et A.

Pour le Si particulièrement, il est prudent de ne pas dépasser 2 % (formation de graphite). Ces aciers donnent après trempe et léger revenu une $R_e \geq 140$ k/mm², mais A ne dépasse guère 7 %.

Böhler les fabrique en deux nuances :

Douce 1 % Si ; 1 % Cr ; 0,4 à 0,5 % C ; 0,3 % Mn

Dure 2 % Si ; 2-4 % Cr ; 1 % C ; 0,5 % Mn.

b) *Aciers au Si* : 0,3 à 0,5 % C et 1,5 à 2,5 % Si. On dépasse rarement 2 % Si. Ces aciers ont des caractéristiques assez sensiblement équivalentes à celles des précédents (Becker, Böhler, Glockenstahlwerke). Ils conviennent comme ressorts de soupapes devant résister à la corrosion (voir ces aciers).

Les ressorts de tampons de chocs (très durs) sont aussi généralement de cette composition.

c) *Aciers au Mn Si* : Ils semblent être préférés par la plupart des aciéries pour les ressorts soumis à des chocs nombreux et violents (automobiles). Le Mn, tout en augmentant R_e et R_r (moins que les éléments précédents cependant), agit peu sur A et ρ .

La composition de ces aciers est comprise dans les limites suivantes :

0,4 à 0,55 % C ; 1 à 1,5 % Si ; 0,4 à 0,5 % Mn.

0,5 % C ; 0,6 à 0,7 % Si ; 0,8 à 1 % Mn.

Ils sont fabriqués et souvent considérés comme matière de premier choix par la plupart des aciéries (Glockenstahlwerke, Krupp, Krefelderstahlwerke).

On donne aussi la composition :

0,3 à 0,4 % C ; 0,8 à 1 % Si ; 0,9 % Mn (carrosserie)

0,3 à 0,4 % C ; 1,5 à 1,8 % Si ; 0,9 % Mn (wagons et locomotives)

d) *Aciers au Mn* : Ce sont les aciers ordinaires pour ressorts.

Becker donne : pour automobiles : 0,32 à 0,38 % C ; 0,8 à 0,9 % Mn ;

Pour voitures de chemins de fer : 0,35 à 0,42 % C ; 0,8 à 1,2 % Mn.

Toutes les aciéries produisent ces aciers, parfois même avec une plus forte teneur en C.

e) Enfin, certaines usines produisent aussi des aciers au Cr (jusqu'à 1,2 %).

Traitement thermique. — Par suite de la prépondérance du groupe R_r , R_e , les ressorts sont toujours trempés, puis légèrement revenus pour augmenter la résilience (ne pas dépasser une température de revenu telle qu'un morceau de bois frotté sur le ressort donne des étincelles).

Quant à la trempe, elle se fera à l'huile pour les variétés les plus dures, à l'eau pour les autres.

Les petits ressorts sont souvent revenus en faisant flamber l'huile dont ils restent couverts en sortant du bain.

3. — Aciers à grande résistance aux agents d'oxydation et aux acides.

a) *Influence du grain.* — Toutes autres choses égales, la solubilité d'un acier dans un acide est d'autant plus grande que ses cristaux constituants sont plus petits. Ce n'est qu'une application de la loi chimique suivant laquelle deux corps réagissent d'autant mieux l'un sur l'autre qu'ils sont à un état plus divisé, les surfaces de séparation des cristaux étant ici un chemin tout indiqué à l'attaque de l'acide.

Les divers traitements diminuant la grosseur du grain occasionneront donc une augmentation de solubilité : le travail à froid (laminage et étirage), le forgeage, dans une moindre mesure, et surtout la trempe suivie de revenu (vers 400° pour les aciers au C) qui donne la structure osmonditique à grain très fin.

Quant au travail à froid, son action a déjà été signalée plus haut. Un fil de 5,2 millimètres de ϕ réduit à 27 % de sa section primitive, subit une augmentation de dureté de $\frac{192}{100}$ mais sa solubilité dans $H^2 SO^4$ passe aussi de 100 à 603.

b) *Influence de la composition.* — Divers éléments augmentent la résistance de l'acier aux acides.

1) Le silicium est relativement peu actif. Böhler emploie cependant des aciers au Si à environ 2 % pour les pièces de soupapes,

particulièrement pour les ressorts. (L'action du *Si* est ici double : il augmente à la fois la résistance à l'oxydation et surtout la limite élastique).

Alors qu'un acier doux perd 7,48 % de son poids dans un bain de H^2SO^4 (50 %) au bout de 21 heures, un acier à 2,67 % *Si* n'y perd que 3,32 %.

2) Le *Ni* donne de meilleurs résultats. Un acier à 25%-28% de *Ni* ne rouille pratiquement pas (Böhler, Becker, Rheinmetall, etc.). C'est le même acier qui n'est pas magnétique. De là deux raisons de son emploi sur les navires aux environs des boussoles.

Le même acier, jusqu'au-dessus de 30 % de *Ni*, a été utilisé pour les aubes de turbines à vapeur ; on lui préfère généralement maintenant un acier à 5 % de *Ni* qui, bien que moins résistant à l'oxydation, a des caractéristiques mécaniques meilleures (*Re* et *Rr*) et dont le travail est moins difficile. On emploie actuellement beaucoup les aciers au *Cr-Ni* et au *W-Ni* (voir plus bas).

La résistance à la corrosion des aciers au *Ni*, même à faible teneur, a été une des raisons de leur emploi pour la construction des ponts et charpentes.

3) Les aciers au *Cr* sont de loin les plus intéressants : Le tableau suivant donne les pertes par la rouille relativement au fer pour lequel la perte est comptée 100 :

% C	% Ni	% Cr	
0,12	—	—	100
0,23	26,25	—	40
0,13	—	2,9	30
0,49	—	19	15

On a beaucoup employé les aciers de teneur :

0,3 à 0,4 % C — 0,45 % *Si* — 0,45 % *Mn* — 11 à 14 % *Cr*.

C'est l'acier Krupp, fabriqué cependant par d'autres aciéries (Bergische stahl Industrie) (lames de couteaux inoxydables).

Les aciers à 13 % de *Cr* forment d'ailleurs la base des aciers résistant aux acides. Si on y ajoute de 2 à 5 % de *Mo*, on obtient un acier résistant à tous les acides minéraux étendus.

Ces aciers se font généralement au four électrique.

4) Les aciers au *Cr-Ni* : Les fameux aciers Krupp V1M et V2A employés pour les instruments de chirurgie et de dentiste, pour les aubes de turbines, etc., sont de cette catégorie.

Le tableau suivant donne une idée de leur résistance :

PERTE DE POIDS

	Par la rouille de l'air	Par l'eau de la mer	dans HNO ₃ froid à 10 %	Dans HNO ₃ bouillant à 50 %
Acier	100	100	100	100
Acier à 9 % <i>Ni</i> . .	70	79	97	98
Acier à 25 % <i>Ni</i> .	11	55	69	103
V1M	0,4	5,2	0	0
V2A	0	0,6	0	0

V1M est un acier martensique comme ses variétés V3M et V5M. Leur composition est approximativement :

0,2 à 0,4 % C, 2 à 4 % *Ni*, 10 à 14 % *Cr*.

V1M s'emploie pour des pièces de machines dont la sollicitation est assez forte (*Rr* = 80 k/mm²; *Re* = 65 k/mm²), par exemple les aubes de turbines, les soupapes. Il devient très dur par la trempe (à l'air ou à l'huile).

V3M plus fragile (plus forte teneur en *Cr*) est plutôt utilisé là où la dureté est nécessaire (roulements à billes, instruments tranchants).

V5M a les mêmes emplois que V1M ; il passe déjà aux aciers austénitiques et subit donc peu de changement par la trempe. Il s'emploie pour tous les usages où la résistance à la corrosion est la qualité principale à obtenir.

Comme tous les aciers austénitiques, il est très difficile à travailler.

Il est à remarquer que les caractéristiques mécaniques des aciers à forte teneur en *Cr* et *Cr-Ni* ne tombent sérieusement qu'entre 400 et 500°.

Pour la production et le traitement de ces aciers, voir « aciers pour la construction mécanique ».

5) *Aciers au Cr-Wo* : Plusieurs aciéries produisent pour les soupapes des aciers se rapprochant des aciers à coupe rapide (Böhler, acier à 8 à 10 % Wo; 2 à 3 Cr; 0,45 Vn) et même des aciers à coupe rapide (Krupp).

Mais, dans ces cas, ce que l'on recherche plutôt en eux, c'est le maintien des bonnes caractéristiques mécaniques aux hautes températures.

4. — **Aciers à faible coefficient de dilatation.**

C'est l'Invar (0,30 à 0,5 % C-36 à 38 % Ni), utilisé pour les instruments de mesure de précision.

5. — **Aciers présentant à la fois une grande résistance à l'usure et une grande ténacité.**

C'est avant tout le domaine des aciers au Mn.

a) *Aciers pour organes de machines exposés à une forte usure* et devant présenter, cependant, une grande ténacité (ce qui exclut les aciers cémentés). C'est le cas des pièces pour dragueurs, des mandrins de laminage et d'étirage (tubes sans soudure), matrices à briques et briquettes, broyeurs, pointes et croisements de rails, de laminoirs, etc.

On emploie universellement l'acier polyédrique suivant (fig. 24):

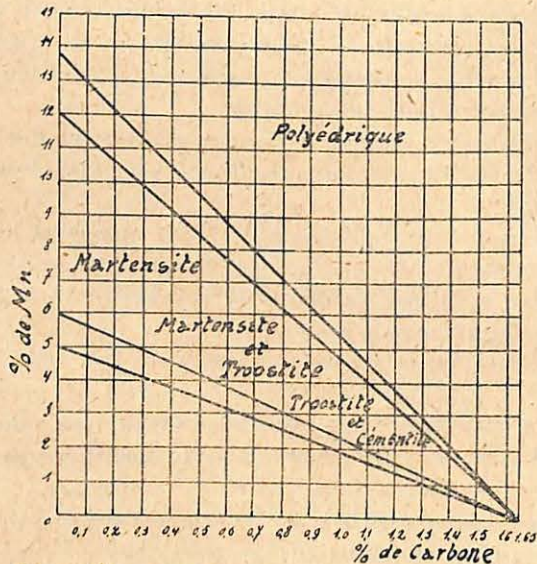


Fig. 24. COMPOSITIONS DES ACIERS AU Mn. D'APRES GUILLET

0,95 à 1,15 % C,
10 à 13 % Mn,
0,2 à 0,4 % Si,

acier d'une grande ténacité et, en même temps, d'une grande dureté, mais d'une dureté passive, sans mordant, pénétrant l'acier intimement et qui lui donne son extraordinaire résistance à l'usure. Ces propriétés font que les objets faits de cet acier (généralement appelé Hadfield) doivent recevoir leur forme définitive par coulée ou forgeage. (Il se laisse forger comme un acier ordinaire entre 1,100 et 750°.)

Production de ces aciers. — Elle se fait généralement au four électrique, bien que très souvent la fusion soit réalisée au four Martin, le finissage se faisant seul au four électrique (généralement le four Héroult).

Suivant le degré de pureté de la charge (voir four électrique), la fusion est oxydante ou non. Si elle se fait au four Martin, elle est toujours oxydante.

L'inconvénient de l'oxydation est de faire passer le Mn des riblons de la charge dans la scorie, mais, par contre, sans oxydation, on risque d'obtenir une teneur trop forte en C.

La préparation de cet acier se fait parfois complètement en four Martin (Concordia) ou plutôt on y prépare un acier doux dont on mélange 80 à 82 % à 20 à 18 % de ferro-manganèse, fondu au cubilot.

Il ne faut pas porter le tonnage de la coulée au-dessus de 3 à 4 tonnes, car cet acier corrode rapidement les tuyères.

Traitement thermique. — Les pièces moulées subissent un recuit comme des pièces ordinaires. Elles sont ensuite portées à 1000-1100° et trempées à leur sortie du four dans de l'eau constamment renouvelée, de façon à présenter une température d'environ 20°.

Certaines usines profitent, paraît-il, de ce traitement pour supprimer le recuit préalable. Krieger a constaté que ce recuit donnait une plus faible proportion de pièces défectueuses.

b) *Aciers pour rails, pour bandages.*

Ce sont des aciers perlitiques au Mn.

Rails	0,2 à 0,3 C	0,55 à 7 Mn
Bandages.	0,3 à 0,4 C	1,3 à 1,4 Mn

Le *Mn* augmente dans ces aciers et la résistance à l'usure et les *Rr* et *Re*.

Ces aciers pour rails qui ne sont pas des aciers spéciaux proprement dits, viennent des aciéries Thomas.

c) *Aciers pour cylindres de moteurs.*

Ce sont souvent aussi des aciers au *Mn* dont la teneur est d'environ 2 %. On emploie aussi des aciers au *W* également à environ 2 %. On retrouvera également ces aciers au *W* dans la fabrication des canons de fusils pour lesquels la sollicitation est d'ailleurs comparable à celle des cylindres de moteurs.

6. — **Cylindres de laminoirs.**

Les aciers pour cylindres de laminoirs à chaud sont des aciers à 0,7 à 0,8 % de *C* et 0,8 % de *Mn* assez analogues aux aciers pour matrices à chaud, la proportion de *C* étant cependant augmentée, les chocs étant moins à craindre.

Pour les laminoirs à froid, on exige un acier très dur et se laissant facilement pénétrer par la trempe, de façon que, toute la section du cylindre étant trempée, celui-ci constitue une masse presque indéformable.

On utilise dès lors un acier comprenant de 0,8 à 1 % *C* et de 2 à 4 % *Cr*. La proportion de *Cr* croît avec le diamètre du cylindre, la pénétration de la trempe étant d'autant plus profonde que la proportion de *Cr* est élevée.

Traitement de ces aciers. — Forgeage : 850-950°. (Le *Cr* élève la température de transformation.) Trempe : 800 à 830°. Les pièces sont plongées dans l'eau et achèvent de se refroidir dans l'huile. (Les aciers au *Cr* ont, en effet, une tendance prononcée à la formation de fissures et, d'autre part, la trempe ne doit pas être trop douce, vu le but qu'on se propose.) Les pièces de faibles dimensions ne peuvent cependant être trempées qu'à l'huile.

A remarquer que, lorsque la teneur en *Cr* dépasse 3,2% (voir fig. 25), l'acier est martensitique, et, par suite, « selbshärtend ». La trempe se fait alors par simple refroidissement à l'air.

Pour les laminoirs à tubes, dits « Pilgerwalzen », on emploie un acier au *Cr-W* (3 % *Cr* et environ 1,5 % *W*). Ces Pilgerwalzen sont recuits après coulée.

Trempe des cylindres. — Pour diminuer le danger de formation de fissures, les cylindres sont percés avant trempe. En effet,

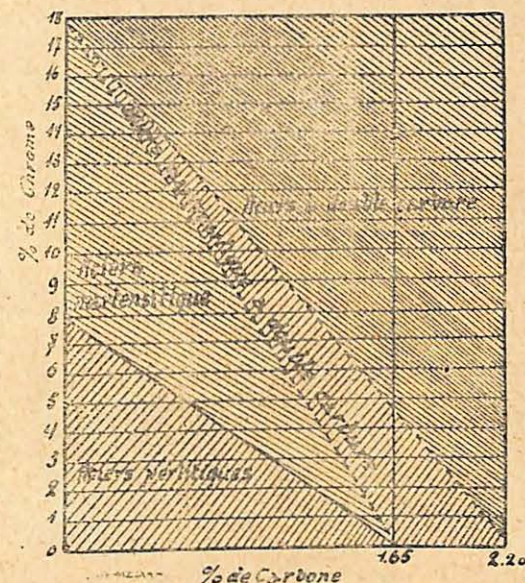


Fig. 25 DIAGRAMME DES ACIERS Gr.
D'APRES GUILLET

on sait (voir aciers pour outils de coupe) que l'intérieur des pièces assez fortes est soumis à de fortes tensions lors de la formation de martensite. On y remédie en enlevant ce noyau. Les parties à tremper sont alors entourées d'une couche de ciment (maintenue par un tube en tôle) pour éviter la décarburation, les autres, d'enveloppes d'argile.

Le chauffage se fait progressivement dans un four à réverbère.

La température de trempe obtenue, le cylindre est débarrassé de son enveloppe, brossé énergiquement et trempé n utilisant pour la manutention une chaîne fixée dans la cavité intérieure à l'aide d'un piton vissé.

7. — **Aciers pour billes et roulements à billes.**

- On demande à ces aciers :
1. que la trempe leur donne une grande dureté et qu'elle pénètre dans toute la section ;
 2. en même temps une bonne résistance à la compression qui leur permette de ne pas s'écraser aux hautes pressions auxquelles ils sont soumis.

Ce sont presque toujours des aciers au *Cr*.

Le *Cr* { donne une grande dureté,
facilite la pénétration de la trempe,
augmente les limites élastiques et de rupture.

Les aciéries distinguent généralement :

les aciers pour boîtes de roulements à billes
et les aciers pour billes.

1) Les aciers pour roulements à billes ont, en général (Krefelder-Stahlwerke-Krupp), de 1,5 à 2 % de *Cr* et 0,9 à 1,1 % de *C*.

2) Les aciers pour boîtes de roulements à billes contiennent de 1,75 à 2,25 % de *Cr* et de 1 à 1,2 de *C* (mêmes aciéries).

Les aciers pour boîtes sont plus durs et ont une résistance plus grande, car le remplacement d'une boîte est plus coûteux que celui d'une bille.

C'est surtout la plus grande proportion de *Cr* qui leur donne cette grande dureté et cette résistance.

La différence dans la teneur en *C* aurait, paraît-il, une autre raison : Les billes s'échauffent plus vite que la boîte, or (Mars, p. 227) la conductibilité d'un acier diminue quand la teneur en *C* augmente. Le refroidissement des billes sera donc plus facile si la teneur en *C* est moindre.

Böhler, dont les aciers pour billes et roulements semblent moins en vogue que ceux cités plus haut, donne comme composition :

Acier pour billes . . . 0,95 à 1,05 % de *C* et 1,3 à 1,5 % de *Cr* :

Acier pour roulements 1,05 à 1,15 % de *C* et 1,5 à 1,8 % de *Cr*.

Certaines maisons : « Vereinigte Edelmetallwerk », à Dortmund, entre autres, produisent deux qualités d'aciers au *Cr* pour billes :

a) Une qualité avec forte proportion de *Cr* pour billes de fort diamètre ;

b) Une qualité avec moindre proportion de *Cr* pour billes dont le diamètre est moindre que 15 millimètres.

Cette distinction est assez logique, une moindre quantité de *Cr* est certainement nécessaire pour faire pénétrer la trempe jusqu'au centre de billes de faible diamètre.

La plupart des aciéries font aussi un acier pour billes ne contenant que du *C*, pour usages ordinaires, sans fatigues trop grandes. Encore convient-il de ne l'employer que pour des billes dont le

diamètre est inférieur à 12 millimètres (la trempe ne pénétrant pas assez profondément).

L'acier pour roulements à billes est généralement livré sous forme de tubes.

Ces tubes ont été jusqu'ici fabriqués par le procédé Ehrhardt.

Les usines Becker, à Willich, ont cependant essayé le procédé Mannesmann. Les résultats n'ont guère été satisfaisants jusqu'à ce jour. Le procédé Mannesmann soumet, en effet, le métal à une dure épreuve qu'il ne peut supporter que si la température de forgeage est suffisamment élevée. Or, toute température élevée augmentant la grosseur du grain, diminue la dureté après trempe (voir aciers pour aimants). L'étirage des tubes donne à l'acier une résistance très grande.

Production des aciers au Cr. — La fusion est généralement réalisée au four Martin en s'efforçant de conserver une forte teneur en *C* pour ne pas avoir un bain trop oxydé.

On utilise pour l'affinage au four électrique la scorie carburée.

Après un temps variant de 1 heure à 1 heure 1/4, la désoxydation est terminée, on ajoute les ferros. Ce bain est recarburé (fonte) et les portes fermées; après 1 heure, on ajoute le *Fe-Si* (on a porté la température à 1760° environ). On laisse refroidir à 1650-1675 pour la coulée.

Il semble que l'emploi de ferrochrome à 2 % *C* soit préférable à celui à 6 % *C* qui provoque la formation de fissures capillaires.

Traitement de l'acier au Cr.

Forgeage : 950-850°.

Recuit : 700-720° dans les tubes avec charbon de bois.

Trempe : 840-850° dans l'huile, à cause de la tendance à la production de fissures des aciers au *Cr*.

On recommande de laisser revenir l'acier dans un bain d'huile à 170-180° durant 10 à 15 minutes.

Usinage. — Le meulage doit être fait prudemment pour éviter les fissures que la mauvaise conductibilité des aciers au *Cr* amène facilement.