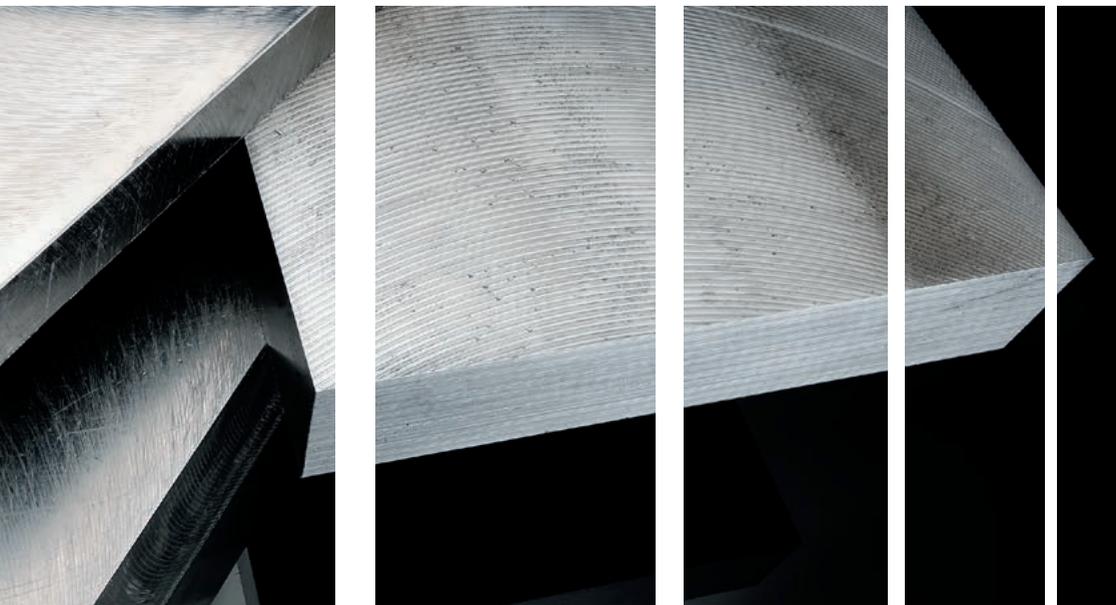


# Hertsch AG

*Edelstähle/Aciers fins*



## L'acier traité élémentaire

Hertsch AG  
Edelstähle  
General Wille-Strasse 19  
8002 Zürich

Telefon 044 208 16 66  
Fax 044 201 46 15  
info@hertsch.ch  
www.hertsch.ch

## **Édition 2016**

Editeur:

Hertsch AG, 8002 Zürich

Auteur:

Paul Maser, ing. dipl. EPF

(adaptation technique par endroits par notre collaborateur H. Kissling  
traduction par E. Berner)

Imprimerie:

FO-Zürisee AG, 8712 Stäfa

# Répertoire

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Notions générales</b> .....	2
<b>Petit cours de micrographie</b> .....	3
<b>Récapitulation</b> .....	11
<b>Le recuit</b> .....	13
<b>La trempe</b> .....	16
<b>Le diagramme TTT</b> .....	20
<b>Le revenu</b> .....	28
<b>L'amélioration</b> .....	30
<b>La cémentation</b> .....	31
<b>Aciers alliés</b> .....	33
Le soufre et le phosphore .....	35
Le manganèse .....	35
Le silicium .....	35
Le chrome .....	36
Le tungstène .....	36
Le molybdène .....	37
Le vanadium .....	37
Le cobalt .....	37
Le nickel .....	38

# Introduction

Lors de nos entretiens journaliers nous prenons contact avec les différents groupes de «connaisseurs de l'acier», ceux qui savent ce qu'est l'acier, ceux qui ne le savent pas et ceux qui s'imaginent le savoir.

On objectera que, suffisamment de livres ont déjà été écrits sur l'acier. Certes, mais ces ouvrages sont en général très volumineux car, leurs auteurs avaient l'obligation de traiter l'acier de façon très approfondie. Ici, par contre, nous voulons expliquer en abrégé *ce qu'est l'acier*.

Par cette brochure, nous nous adressons à la fois aux lecteurs, qui, jouissent de bonnes connaissances en acier, en leur offrant une courte récapitulation, mais également et surtout à ceux désireux de savoir ce qu'est l'acier.

Certainement, il est possible de recuire, tremper et cémenter journallement, sans connaître les évolutions auxquelles est soumis l'acier lors de ces traitements. Mais, nous sommes de l'avis que, la réussite du traitement de l'acier ne doit pas dépendre du hasard, bien au contraire, les bons résultats sont les fruits de solides connaissances.

Un slogan américain dit fort malicieusement: «Il suffit de savoir appuyer sur un bouton, afin de savoir photographier». Il est vrai que de telles connaissances peuvent suffire à un débutant. Mais, pendant qu'un simple «presseur de bouton» restera un photographe médiocre, un homme réfléchi désirera étendre son savoir et il cherchera à découvrir les forces qu'il libère au moment où il appuie sur le fameux bouton. Une fois acquis un certain degré de notions sur la conception photographique, il s'apercevra également des difficultés à surmonter. Alors, selon son tempérament, il fera tout pour les éviter, ou tout pour les résoudre par des moyens appropriés.

La situation est la même pour le traitement des aciers. Un routinier les réussira le plus souvent, même sans grandes connaissances théoriques, car, l'acier est en général «bon patient» et on admet d'avance un certain nombre d'insuccès. Mais, lorsqu'il n'y a *ni* connaissances, *ni* pratique du traitement des aciers, quelques catastrophes sont inévitables et ne manqueront pas de se produire.

Si, par cette brochure, nous arrivions à donner à nos lecteurs un aperçu des différentes phases lors du recuit, de la trempe, etc. et s'il était possible d'éveiller en eux une meilleure compréhension pour le traitement de l'acier, le présent article aurait pleinement atteint son but.

HERTSCH AG

# Notions générales

*Qu'est-ce que l'acier?*

Vous savez certainement répondre à la question: Qu'est-ce que le fer?

Un élément, un métal. Désignation chimique Fe (ferrum).

De même, qu'est-ce que le carbone?

Egalement un élément, mais non-métallique. Désignation chimique C (Carbonum).

*L'acier est un alliage de fer avec au maximum 1,7% de carbone.*

Le fer d'une teneur supérieure à 1,7% C est désigné selon DIN par fer brut ou fer fondu. La teneur en carbone influence de façon décisive les propriétés de l'acier. Lorsqu'elle est croissante, le point de fusion baisse, la trempabilité augmente et la forgeabilité diminue. Selon les normes DIN, la dénomination acier est soumise au critère de la forgeabilité qui, cesse pratiquement à 1,7% C. Mais, il y a des exceptions, dont deux, à savoir: Il existe des aciers hautement alliés au chrome de plus de 1,7% C (p. e. 1.2436, C= 2,05%) qui, malgré cette teneur élevée en carbone sont forgeables. Il y a également des aciers pour aimants hautement alliés au nickel-aluminium non-forgeables mais, bénéficiant de la désignation acier. L'ancienne dénomination «fer», pour l'acier à faible teneur en carbone, est supprimée car, fer en tant que terme insuffisamment précis ne permet pas une séparation claire d'appellation et le passage à l'acier demeure successif.



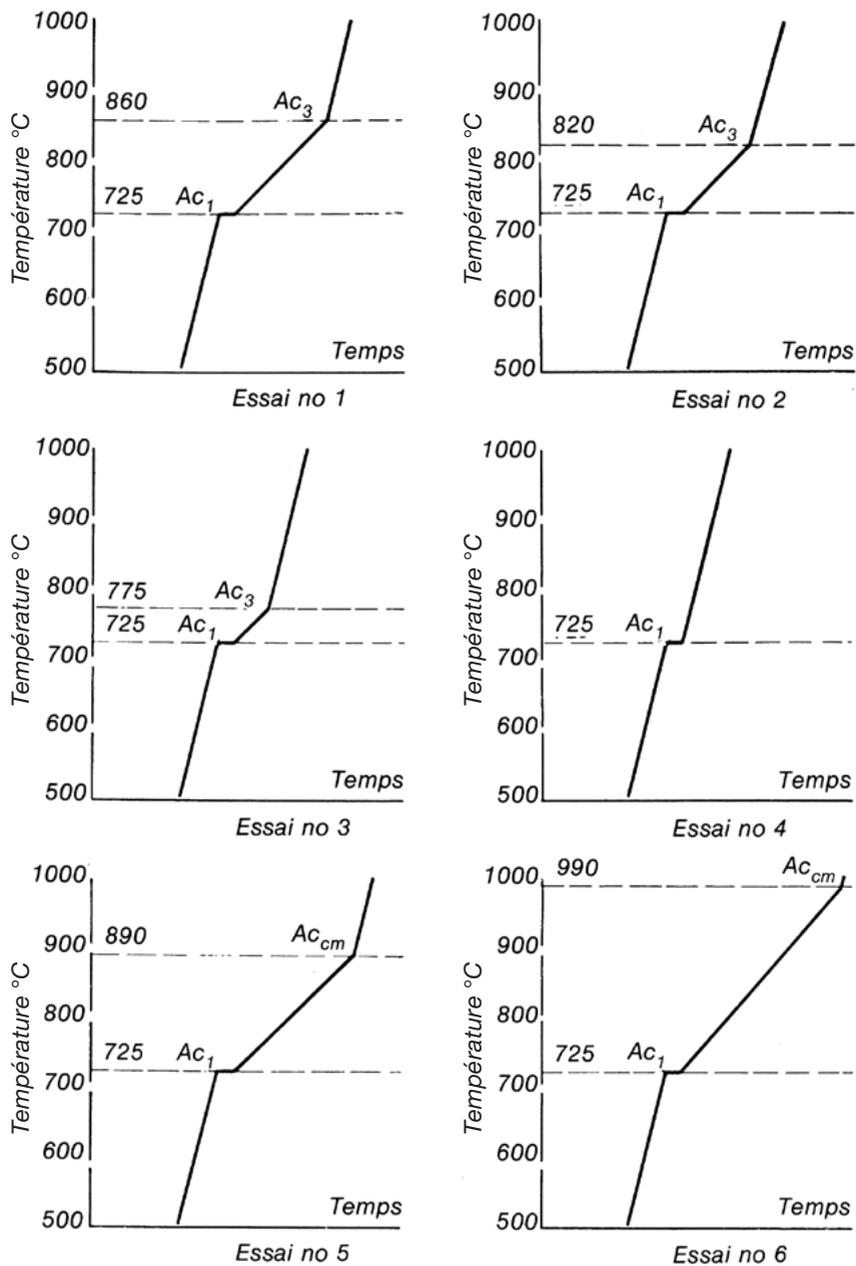


Fig. 2

Nous imaginons de réaliser une série d'essais simples en supposant de disposer de 6 éprouvettes désignées comme suit:

- Eprouvette 1: teneur en carbone = 0,2%
- Eprouvette 2: teneur en carbone = 0,4%
- Eprouvette 3: teneur en carbone = 0,6%
- Eprouvette 4: teneur en carbone = 0,9%
- Eprouvette 5: teneur en carbone = 1,2%
- Eprouvette 6: teneur en carbone = 1,4%

**Essai no 1** (avec l'éprouvette 1) C = 0,2%.

Nous échauffons celle-ci par apport constant de chaleur et relevons dans des intervalles réguliers de temps, soit toutes les 5 minutes, la température de l'acier. Les valeurs, ainsi retenues, doivent être reportées dans un système de coordonnées (fig. 2), en fonction du temps, avec en abscisse le temps, en ordonnée la température. Au fil du temps, nous constatons une progression assez régulière de la température de l'acier, conformément à ce que nous attendions. L'acier s'échauffe de plus en plus et atteint 300°, puis 500° C, de façon tout à fait normale. Consciencieusement, nous reportons les températures mesurées sur notre diagramme, en fonction du temps. Et déjà, la température parvient à 725° C mais, à notre stupéfaction, elle demeure pendant 5–10 minutes stationnaire. Une erreur est exclue, car l'échauffement continue normalement. Enfin, elle remonte mais, fort lentement comparée à la première phase puis, à partir de 860° C, de nouveau plus rapidement.

Chose curieuse et inattendue. En consultant le diagramme, nous constatons: Température progressant régulièrement jusqu'à 725° C avec un arrêt à celle-ci durant un certain temps puis, montée plus lente jusqu'à 860° C et au-delà de nouveau plus rapidement. Nous appelons les températures de 725 et 860° C «points d'arrêt» en les désignant par  $Ac_1$  (Arrêt chauffage 1) et  $Ac_3$  (Arrêt chauffage 3).

Ces constatations surprenantes en rapport avec l'acier demeurent pour l'instant inexplicables. Nous en prenons tout simplement connaissance et fidèles à notre système de coordonnées, nous reportons les deux points d'arrêt (725 et 860° C) sur notre tableau (fig. 3).

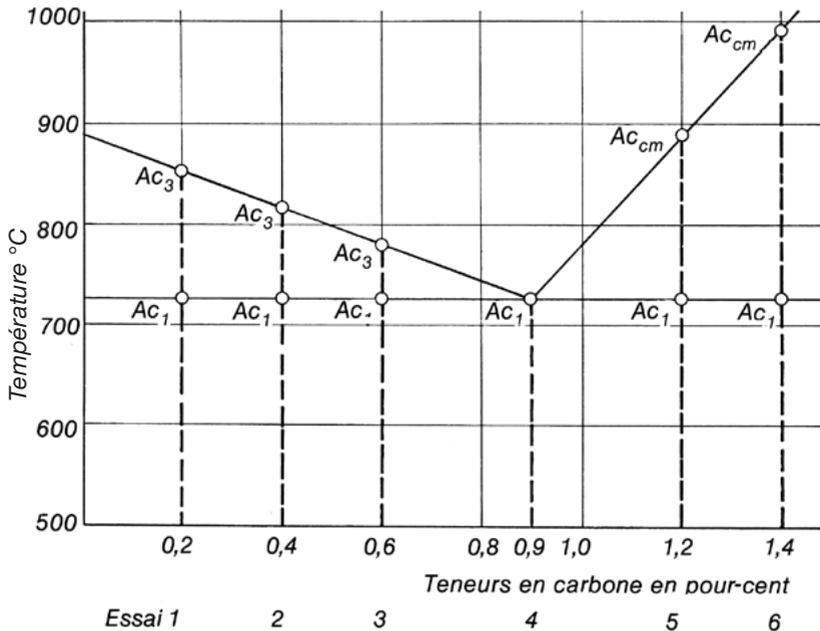


Fig. 3

**Essai no 2** (avec l'éprouvette 2) C = 0,4%.

Tout d'abord, la température monte de façon normale et proportionnelle au temps d'échauffement. Mais, à 725° C la montée de la température s'arrête, analogue à l'essai no 1. Un peu plus tard, nouvelle montée lente et correspondante à l'essai no 1 puis, non pas dès 860° mais, déjà dès 820° C plus rapidement. Les données de l'essai no 2 sont à reporter sur le diagramme (fig. 3), soit à C = 0,4% premier point d'arrêt (Ac<sub>1</sub>) à 725°, deuxième point d'arrêt (Ac<sub>3</sub>) à 820° C.

**Essai no 3**, C = 0,6%.

Montée régulière de la température jusqu'à 725° C puis, point d'arrêt Ac<sub>1</sub>, suivie d'une poussée lente jusqu'à 775° C au point d'arrêt Ac<sub>3</sub>. Nous reportons sur le diagramme (fig. 3) à C = 0,6% Ac<sub>1</sub> 725°, Ac<sub>3</sub> 775° C.

**Essai no 4**, C = 0,9%.

Avec de l'expérience déjà acquise, nous attendons et obtenons Ac<sub>1</sub> à 725° C, premier point d'arrêt. Mais, vaine attente, il n'y a pas de Ac<sub>3</sub>. Ainsi donc, nous reportons sur le diagramme (fig. 3) à C = 0,9% seulement Ac<sub>1</sub> 725° C.

Que peut réserver le prochain essai?

**Essai no 5, C = 1,2%.**

Point<sup>2</sup> d'arrêt 1 à 725° C, donc normal. Y a-t-il alors un deuxième point d'arrêt? Effectivement, à 890° C se manifeste le deuxième coude connu de la courbe d'échauffement. A l'accoutumée, nous reportons sur le diagramme (fig. 3) à C = 1,2%  $Ac_1$  725°,  $Ac_{cm}$  890° C (aux aciers d'une teneur en carbone supérieure à 0,9%, nous parlons de  $Ac_{cm}$  au lieu de  $Ac_3$ ).

**Essai no 6, C = 1,4%.**

Nous avons constaté et reportons sur le diagramme (fig. 3) à C = 1,4%  $Ac_1$  725°,  $Ac_{cm}$  990° C.

Peu à peu ayant compris, nous relierons entre eux tous les points  $Ac_1$  et tous les points  $Ac_3$ , resp.  $Ac_{cm}$ , autrement dit, établissons la liaison entre tous les points d'arrêt inférieurs et tous les points d'arrêt supérieurs et nous obtenons: le diagramme fer-carbone. Une partie de sa signification nous est maintenant connue. A présent, restent à expliquer les expressions ferrite, perlite, cémentite, austénite, ainsi que les phases de transformation lors de l'échauffement de l'acier. Son comportement particulier, ses points d'arrêt reportés au diagramme fer-carbone demeurent constatés, mais demandent également explications.

En cherchant réponses, nous commençons par mettre l'éprouvette no 4 sous le microscope, avant son échauffement. Il se justifie de présumer que celle-ci (C = 0,9%), présente la situation la plus simple avec son unique point d'arrêt, décelé lors de l'essai d'échauffement.

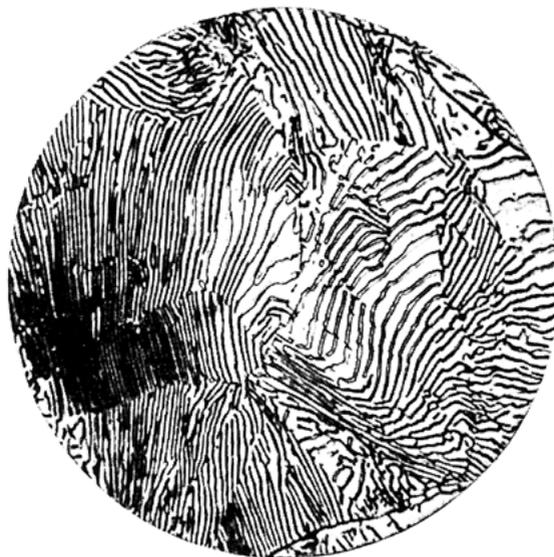


Fig. 4

Perlite

Micrographie 1:1000

Notre regard attentif plonge maintenant dans le microscope afin d'y reconnaître la formation présentée par figure 4. La métallographie désigne cette configuration, semblable à une empreinte digitale et eu égard à son brillant de nacre, sous le nom de *perlite*. Rien, de ce que nous y voyons, est uniforme, soit, des lamelles emboîtées les unes dans les autres. Les striures blanches représentent le fer pur, nommé *ferrite* (structure tendre), les striures noires le carbure de fer ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), appelé *cémentite* (structure dure) en métallographie.

En échauffant notre éprouvette, rien ne change avant le premier point d'arrêt de  $725^\circ\text{C}$ . A cette température la ferrite procède à une recristallisation et le fer alpha se transforme en fer gamma, autrement dit, sa structure cristalline change la construction. Le fer alpha de forme d'un cube massif, se présente en fer gamma de forme d'un cube creux et spacieux. A peine cette évolution achevée, le carbure de fer (cémentite), jusqu'ici se trouvant à côté, s'introduit dans le fer gamma.

Afin que la transformation de fer alpha en fer gamma puisse se réaliser à température basse, la présence immédiate de carbone est indispensable. Seul l'agrégat perlitique dispose d'une constitution adéquate (complexe de ferrite et de cémentite en lamelles). On suppose que le carbone décide le fer alpha à cette transformation afin de mieux se ménager, en séjour agréable, dans le cristal gamma. Plus loin, il sera encore question des températures de transformation sensiblement plus élevées que nécessite le fer alpha en cas d'absence de carbone dans son voisinage immédiat c.-à-d., lorsqu'il est présent en structure indépendante.

Ceci nous explique le point d'arrêt  $\text{Ac}_1$ . La recristallisation du fer nécessite un apport de chaleur et durant son absorption, la température de l'éprouvette cesse de monter.

La solution solide gamma est appelée en métallographie d'après le savant Austen, soit *austénite*.

En continuant d'échauffer notre éprouvette, la température progresse régulièrement jusqu'au point de fusion, sans nouvelles transformations de l'agrégat austénitique, durant cette phase.

Etudions maintenant au microscope la constitution micrographique de l'éprouvette no 3 (C = 0,6%), ainsi que les stades de transformation qu'elle doit passer à l'échauffement. Par expérience, nous reconnaissons maintenant sans difficulté dans ces parties rayées (fig. 5) la perlite. Prenons encore connaissance que, la structure perlitique renferme toujours 0,9% de carbone. Or, vos réflexions vous conduisent, sans hésitation, à la conclusion que, le fond blanc représente le fer pur, donc la ferrite. L'éprouvette no 3 contient en tout seulement 0,6% de carbone, tandis que la perlite en demande 0,9%; or, une partie de la ferrite doit se contenter d'une place en dehors de la perlite. Ainsi, nous trouvons dans un acier d'une teneur inférieure à 0,9% C (agrégat perlitique) indépendamment de la perlite, de la ferrite en quantités d'autant plus élevées, plus la teneur en carbone de l'acier est faible.



Fig. 5

Perlite + Ferrite

Micrographie 1:1000

En échauffant l'éprouvette no 3, la structure ne change en rien jusqu'à 725° C. A cette température, par apport de chaleur (point d'arrêt), la perlite se transforme en austénite alors que, pour l'instant, la ferrite reste inchangée. Uniquement, en continuant la progression de la température, se réalise peu à peu la transformation de la ferrite en austénite. Ce processus absorbe également de la chaleur et la température monte plus lentement. Au point d'arrêt  $A_{c3}$ , toute la ferrite est transformée. Ainsi, nous obtenons l'agrégat uniforme austénique et, par conséquent, la progression de la température de l'éprouvette revient à sa rapidité normale.

Il reste finalement l'éprouvette no 5 ( $C = 1,2\%$ ) présentant une structure reproduite par figure 6. Nous reconnaissons avant tout la perlite d'une teneur de  $0,9\%$  C. Le réseau blanc représente l'excédent de cémentite qui entoure, en forme d'une coque, des concentrations perlitiques. Ceci, nous permet d'imaginer les évolutions lors de l'échauffement de l'éprouvette. A  $725^\circ\text{C}$ , transformation de la perlite en austénite, point d'arrêt  $Ac_1$ . Puis, durant une nouvelle progression de la température, dissolution de l'excédent de cémentite en austénite, par absorption de chaleur. En atteignant le point d'arrêt  $Ac_3$ , tout est dissous et au-delà de cette température subsiste l'agrégat uniforme austénitique.

Ce qui nous intéresse encore sont les *évolutions de l'acier lors du refroidissement*. Ce sujet peut se résumer en quelques mots car, par rapport à l'échauffement, les processus sont seulement inversés. Durant le refroidissement, nous ne parlons plus d'arrêts chauffage  $Ac_3$  et  $Ac_1$ , mais de  $Ar_3$  (Arrêt refroidissement 3) et de  $Ar_1$  (Arrêt refroidissement 1).  $Ar_3$  est environ  $5$  à  $20^\circ\text{C}$  inférieur à  $Ac_3$  et  $Ar_1$  se situe entre  $680^\circ$  et  $710^\circ\text{C}$ , donc également quelque peu inférieur à  $Ac_1$ . Par contre, il n'y a pas de différence analogue de température à  $Ac_{cm}$  et l'explication sur l'évolution de l'acier lors du refroidissement s'arrête là.



Fig. 6

Perlite + Cémentite

Micrographie 1:1000

# Récapitulation

**Ferrite:** fer alpha pur (alpha désigne la forme cristalline).

**Cémentite:** combinaison chimique de fer et de carbone. Carbure de fer,  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

**Perlite:** constitution mixte de ferrite et de cémentite. La teneur en C est toujours égale à 0,9%.

**Austénite:** solution solide gamma. Solution solide de fer et de carbure de fer.

Dans le diagramme fer-carbone:

- les **courbes  $\text{Ac}_1$ ,  $\text{Ar}_1$** , représentent les lignes respectives des points d'arrêt inférieurs.
- les **courbes  $\text{Ac}_3$ ,  $\text{Ar}_3$** , représentent les lignes respectives des points d'arrêt supérieurs des aciers à moins de 0,9% C.
- la **courbe  $\text{Ac}_{\text{cm}}$**  représente la ligne des points d'arrêt supérieurs des aciers à plus de 0,9% C.

Un acier *d'une teneur de moins de 0,9% C* se compose *au-dessous* du point  $\text{Ac}_1$  ( $\text{Ar}_1$ ) de perlite + ferrite, *entre* les points  $\text{Ac}_1$  et  $\text{Ac}_3$  ( $\text{Ar}_3$  et  $\text{Ar}_1$ ) d'austénite + ferrite et *au-dessus* du point  $\text{Ac}_3$  ( $\text{Ar}_3$ ) d'austénite homogène.

Un acier *d'une teneur de 0,9% C* se compose *au-dessous* du point  $\text{Ac}_1$  ( $\text{Ar}_1$ ) de perlite et *au-dessus* d'austénite.

Un acier *d'une teneur de plus de 0,9% C* se compose *au-dessous* du point  $\text{Ac}_1$  ( $\text{Ar}_1$ ) de perlite + cémentite, *entre* les points  $\text{Ac}_1$  et  $\text{Ac}_{\text{cm}}$  ( $\text{Ac}_{\text{cm}}$  et  $\text{Ar}_1$ ) d'austénite + cémentite et *au-dessus* du point  $\text{Ac}_{\text{cm}}$  d'austénite homogène.

Les indications entre parenthèses sont valables lors du refroidissement.

Diagramme de recuit pour aciers au carbone

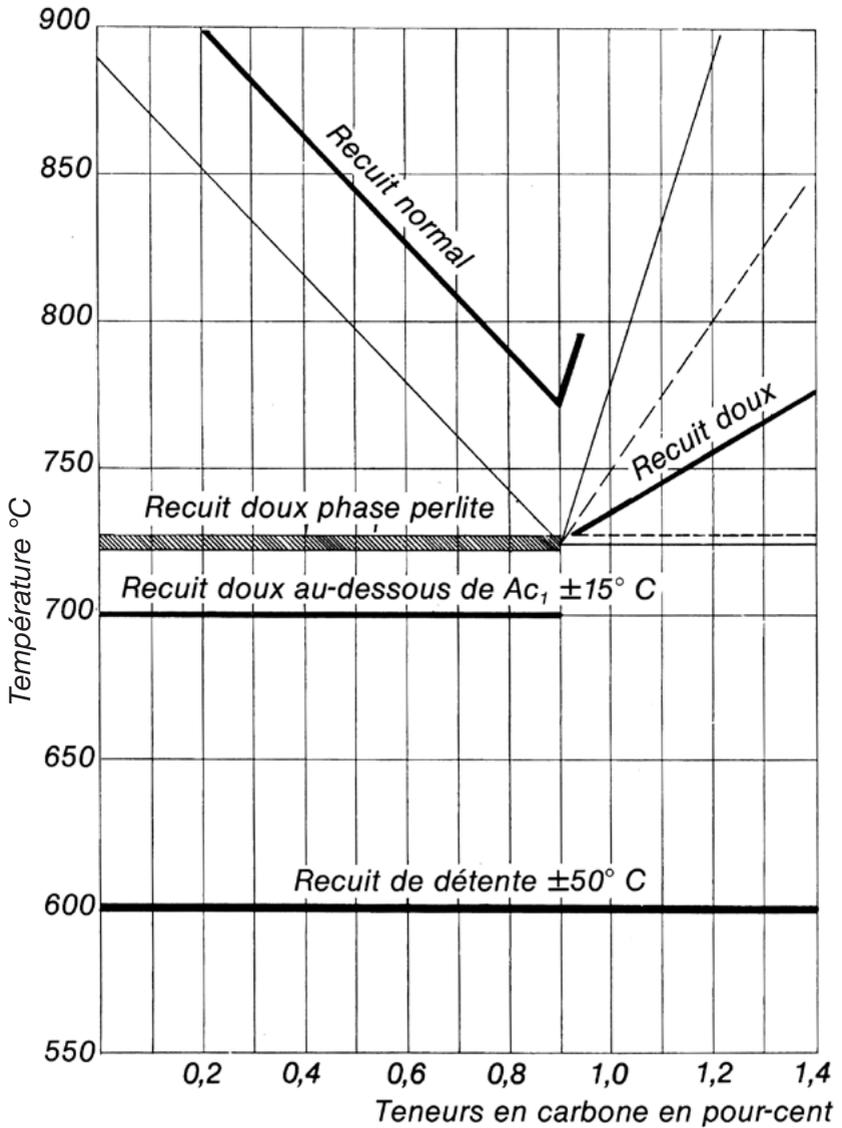


Fig. 7

# Le recuit

Nous distinguons trois sortes de recuit:

- le recuit normal
- le recuit doux
- le recuit de détente

Les températures conformes au recuit normal et au recuit doux dépendent de la teneur en carbone de l'acier. Elles se trouvent indiquées sur le diagramme de recuit (fig. 7).

## Le recuit normal

Les aciers de moins de 0,9% de carbone (aciers de construction) sont le plus souvent soumis au recuit normal. Cette opération consiste à chauffer l'acier à une température juste au-dessus du point d'arrêt supérieur pendant un temps relativement court, suivi d'un refroidissement à l'air libre jusqu'à la température ambiante. Ce traitement thermique a une double action sur la cristallisation de l'acier (échauffement et refroidissement) et permet de régulariser la structure, surtout, après un effort à haute température (p.e. forgeage, matriçage, étirage). Le recuit normal permet le contrôle des valeurs de résistance.

## Le recuit doux

Par le recuit doux, on ne cherche non seulement un état dans l'acier, qui après le forgeage ou le laminage peut présenter, suivant sa teneur en carbone, une résistance de 685–1175 N/mm<sup>2</sup>, d'un caractère doux et aisé à usiner, mais encore la structure la plus favorable à la trempe qui doit suivre.

Ainsi que nous l'avons appris, l'acier se compose à l'état froid de perlite (+ ferrite ou cémentite selon sa teneur en carbone de resp. moins ou plus de 0,9% C). La perlite se compose de ferrite et de lamelles dures en carbure de fer (cémentite). Dans les aciers de plus de 0,9% C, les cristaux perlitiques entiers sont entourés d'un réseau de cémentite. Nous comprenons aisément qu'un tel agrégat de carbures s'oppose à tout travail à froid (tournage, rabotage, fraisage, etc.). Cet inconvénient se complète par un autre aux aciers d'une teneur élevée en C qui, en appliquant leurs températures usuelles de trempes (p.e. 1,4% de carbone entre 760 et 780° C) selon diagramme fer-carbone, transforment qu'une faible partie de l'excédent de cémentite en austénite tandis que le reste subsiste en réseau grossier et devient facilement la cause de fissures dans l'acier. Ainsi, il est conseillé pour les aciers de moins de 0,9% C, alors qu'il est indispensable pour ceux de plus de 0,9% C, de procéder à une meilleure répartition de l'agrégat de cémentite.

C'est le recuit doux qui permet de transformer la cémentite lamellaire dans la perlite et l'excédent de cémentite en réseau, en sphères (forme de boules). Nous parlons alors de cémentite *coalescée* (sphéroïdisée).

Lors du recuit doux, nous distinguons entre les aciers d'une teneur de moins de 0,9% C (aciers *hypoeutectoïdes*) et ceux de plus de 0,9% C (aciers *hypereutectoïdes*).

### a) Le recuit de l'acier hypoeutectoïde

Il existe deux possibilités, à savoir:

- 1) Echauffer la matière à une température *juste au-dessous* de  $Ac_1$  (env. 700° C). La pièce doit être maintenue assez longtemps à cette température, c.-à-d. suivant sa grandeur entre 20 et 30 heures. De petites variations de température de  $\pm 15^\circ$  C sont alors sans aucune influence. Ce traitement ne nécessite pas un refroidissement lent de l'acier dès la température observée.
- 2) Echauffer l'acier à une température *à peine au-dessus* du point  $Ac_1$ , et faire osciller autour de ce point (722–727° C). Puis, refroidissement lent dans le four à une vitesse de 20 à 30° C par heure jusqu'à approximativement 600° C. Dans ce cas, l'acier demande un maintien à la température de recuit limité au temps nécessaire à la bonne pénétration de la chaleur. Ce deuxième traitement, qui permet donc de réduire la durée de recuit, a évincé en grande partie la première méthode. Inutile, de mentionner spécialement, que les fours de recuit doivent être dotés d'instruments de mesure permettant un réglage de température précis et infaillible. Lorsqu'un acier hypoeutectoïde est échauffé 20 à 30° C seulement au-dessus de  $Ac_1$ , on n'obtient déjà plus de la cémentite coalescée, quels que soient le temps de maintien à la température de recuit et la diminution de la vitesse de refroidissement.

### b) Le recuit de l'acier hypereutectoïde

Il importe non seulement de transformer la perlite-cémentite en sphères, mais de coalescer également l'excédent de cémentite. Ce but est atteint aux températures se situant entre les points  $Ac_1$  et  $Ac_{cm}$ , selon diagramme de recuit. Plus la teneur en C est forte, plus la température du recuit doit être élevée et le temps de maintien prolongé. Surtout, de fortes sections nécessitent également des températures plus élevées et des durées prolongées.

Le diagramme de recuit décèle que l'acier hypereutectoïde dispose de champ de recuit plus étendu en comparaison de l'intervalle de température très restreint réservé à l'acier hypoeutectoïde. Nous relevons qu'aux températures élevées se forment un agrégat de cémentite coalescée à texture grossière, c.-à-d. d'une structure facilitant le travail à froid des outils tranchants. Par contre, le recuit à la limite inférieure permet d'obtenir une granulation particulièrement fine en cémentite coalescée et, par conséquent, un agrégat propice à la trempe.

Le recuit doux est réussi le plus facilement sur l'acier *trempe* car, la cémentite de cet agrégat fin et dur, se transforme sans peine en sphères. Il suffit donc, de maintenir l'acier trempé pendant un temps relativement court à environ 700° C puis, de le refroidir lentement à l'air libre.

## **Le recuit de détente**

Ce traitement se pratique à une température basse, soit entre 550 et 650°C. Son but est d'éliminer les tensions internes subsistant après un travail préliminaire à chaud ou à froid. Aucune transformation cristalline ou de modification de résistance n'a lieu.

Tout outil compliqué, ayant obtenu sa forme définitive soit, par le pliage, l'embouissage ou l'usinage par enlèvement de copeaux, nécessite un recuit de détente avant la trempe. Généralement, on ne tient pas assez compte, que le fraisage, tournage ou rabotage créent également des tensions dans l'acier, si petites soient-elles, elles peuvent être à l'origine de déformations et de fissures d'outils, surtout, lorsque de fortes tensions de trempe s'additionnent.

## **Protection contre la décarburation lors du recuit**

Durant l'introduction, il a déjà été question que, l'acier est un alliage de fer et de carbone. Le chapitre sur la trempe nous apprendra que, toute trempabilité nécessite la présence de carbone. Lorsque, à une température élevée, l'acier se trouve exposé à l'oxygène (ou éventuellement à l'acide carbonique ou à la vapeur d'eau), le carbone de l'acier se combine à l'oxygène. Il se produit alors, ce que le chimiste appelle, une oxydation, le carbone se consume. L'acier perd sa trempabilité superficielle.

On évite la décarburation en empêchant tout contact entre l'acier et l'oxygène (atmosphère réductrice) ou en entourant l'acier d'une matière riche en carbone, p.e. copeaux de fonte de fer calcinés. Alors, l'oxygène se combine en premier lieu au carbone d'un taux élevé de la matière protectrice et, notre pièce à tremper sort intacte.

L'importance de la décarburation dépend de la température du recuit et de la durée de maintien de l'acier à celle-ci. Au-dessous du point  $A_{c1}$ , le danger est minime, voire inexistant. Or, sans crainte, nous pouvons faire le recuit de détente exempt de précautions. Par contre, au recuit doux des aciers hypereutectoïdes et, surtout, au recuit normal, il y a lieu d'agir avec prudence et cela en rapport avec les températures élevées à observer. Pas d'atmosphère oxydante!

Le plus souvent, il est sans importance qu'une décarburation superficielle intervienne lors du recuit doux ou du recuit normal, ces recuits n'étant appliqués qu'aux pièces brutes à la suite d'un forgeage ou d'un laminage, soit à des pièces prévues d'être usinées.

# La trempe

Avant de tenter l'explication des processus lors de la trempe, nous sommes obligés de répéter brièvement la métallographie. Au chapitre premier, nous avons appris à distinguer les différentes phases de transformation de l'acier lors de l'échauffement. Nous avons vu qu'à approximativement 725° C, le fer alpha se transforme en fer gamma et nous avons également constaté qu'en même temps, le carbure de fer s'incorpore au fer gamma. Rappelons encore que, lors du refroidissement, ces transformations s'opèrent en sens inverse. Lorsque, la température de l'acier diminue et qu'elle s'approche de la phase critique, il semble que le carbure de fer reçoit des directives. «Il ne se sent plus à l'aise» dans le fer gamma et il se retire de la solution solide. Maintenant seulement, le cube creux du fer gamma peut revenir à la forme du cube massif alpha. *Néanmoins, cette précipitation structurale nécessite du temps.*

Par refroidissement très lent, le carbone resp. le carbure de fer ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), trouve le temps nécessaire afin de se coalescer (à la plus petite surface). Nous avons relevé ce processus durant le recuit doux. Lorsque, la vitesse de refroidissement est normalement lente, la cémentite est précipitée sous forme de lamelles (perlite lamellaire). Au cas contraire, la température de l'acier descend bien au-dessous de sa température de transformation normale avant que, le carbure de fer commence enfin à se séparer du fer gamma. L'austénite est refroidie. Le fer gamma retarde sa transformation jusqu'à ce que la cémentite se soit complètement retirée de lui-même. Lorsque, la vitesse de refroidissement est aussi élevée que, la température de l'acier chute entretemps même à 650° C avant tout début de séparation de la cémentite, une fois ce niveau atteint, elle se précipite vite. La texture nouvellement créée, est en principe une formation analogue à la perlite mais, ces lamelles sont restées très fines, par manque de temps afin de se développer. Cette structure cristalline est appelée *sorbite (de trempe)*.

Le processus entier de transformation se déroule maintenant plus vite. Ainsi, lors d'une augmentation supplémentaire de la vitesse de refroidissement, pour les raisons susdites, la température de transformation descend encore plus bas et le processus de transformation devient plus court. Lorsque, celui-ci se réalise à approximativement 550° C, la texture qui en résulte est si fine qu'elle ne permet même plus, à l'aide du microscope, de distinguer les différentes lamelles. Cette structure cristalline est appelée *troostite (de trempe)*. La troostite est de loin plus dure que la perlite lamellaire.

Il est caractéristique dans toutes ces phases de retrouver en principe toujours les mêmes procédés: Précipitation du carbure de fer du fer gamma, puis, transformation du cube creux gamma en cube massif alpha.

La réaction du carbure de fer est normale jusqu'à une certaine *vitesse de refroidissement critique*. Là, il subit apparemment une «paralysie» car, il ne réagit plus. A une température d'environ 200° C, il y a transformation du fer creux gamma en fer cubique centré alpha alors que, la précipitation du carbure de fer n'a pu avoir lieu. Ce dernier se voit enfermé, coincé dans le cristal cubique, qu'il parvient finalement à déformer en cristal quadratique (tétragone). Ceci provoque de grandes tensions qui, elles, représentent de la dureté.

Cette nouvelle structure cristalline est appelée *martensite*.

La température, nécessaire à la transformation martensitique, dépend de la teneur en carbone de l'acier. Elle se situe pour un taux de carbone de 0,6% à 250°, 0,9% à 220° et 1,5% à 140° C environ.

La micrographie (fig. 8) montre la structure aciculaire martensitique d'une éprouvette de 1,2% C.



Fig. 8

Martensite

Micrographie 1:1000

Le diagramme (fig. 9) nous indique les températures de trempe idéales. Elles dépendent de la teneur en carbone de l'acier car, elles diminuent proportionnellement à l'augmentation de celle-ci, soit de 940 à 760° C environ correspondant à la teneur de 0,9% C et restant stationnaire à cette dernière valeur pour l'acier hypereutectoïde. Nous saisissons facilement la raison car, nous nous rappelons que la structure cristalline ferrite est tendre et celle de la cémentite très dure (la cémentite est environ 270 fois plus dure que la ferrite). En échauffant un acier d'une teneur de 0,9% C à une température ne dépassant pas celle attribuée par la courbe  $Ac_3$ , une partie seulement de la ferrite se transforme en austénite. Il est évident que cette dernière se transforme à son tour en martensite lors du refroidissement, tandis que la ferrite non transformée subsiste en tant que telle soit, en structure tendre, influençant de façon défavorable la dureté de l'acier. Cependant, il n'est pas non plus indiqué de passer à plus de 40 à 50° C au-dessus de la température issue de la courbe  $Ac_3$  car, la finesse du grain en souffre alors que, la dureté n'augmente pas.

Diagramme des températures de trempe opportunes pour aciers au carbone

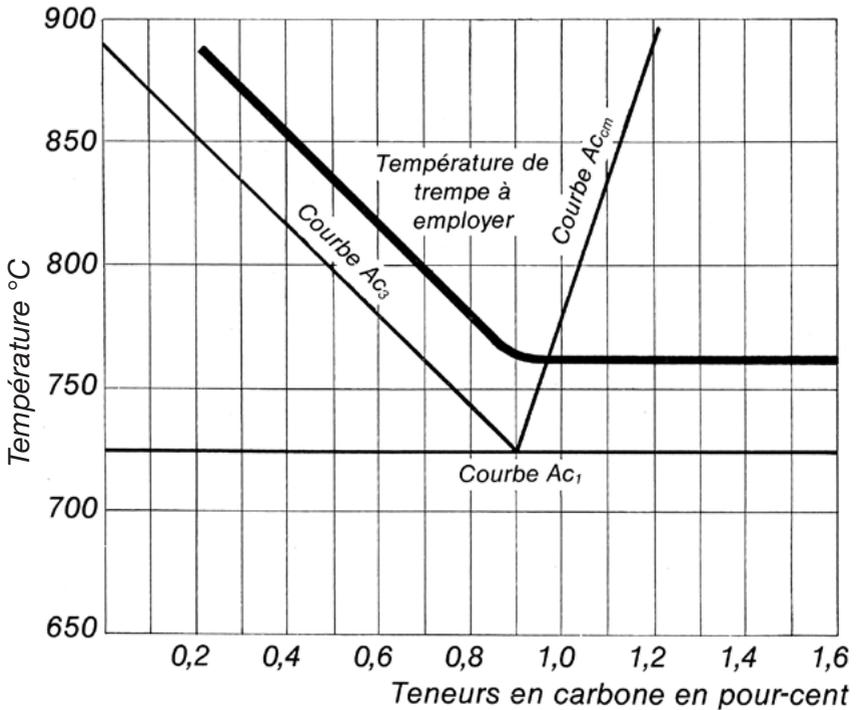


Fig. 9

La situation est toute autre pour un acier de plus de 0,9% C. Ici, il n'est pas nécessaire de dissoudre tout l'excédent de cémentite en austénite, réalisable seulement à la limite de la courbe  $Ac_{cm}$ . Ainsi, il subsiste après la trempe encore de la cémentite non transformée parmi la martensite. Sa dureté étant élevée, plus élevée même que celle de la martensite, elle n'a pas d'influence défavorable sur la dureté de l'acier. Ainsi, s'explique l'importance capitale que, l'excédent de cémentite des aciers hypereutectoïdes soit coalescé, avant leur trempe. Ceci, demande un recuit doux, dont il a été question précédemment. Il reste à retenir, qu'une teneur minimale en carbone est nécessaire afin de provoquer dans le cristal l'état de contrainte (sans issue pour le carbone), considéré comme étant de la dureté. La limite inférieure de la trempabilité se trouve pratiquement vers 0,3 à 0,4% de carbone. Toutefois, le passage de l'acier non trempable à l'acier trempable est successif.

Afin d'échauffer l'acier à la température de trempe, différentes sources de chaleur sont connues, à savoir: Le feu ouvert (à déconseiller pour cause de décarburation), le four à moufle (avec protection contre la décarburation, voir suite), le four à protection gazeuse, le bain de sel, le four à lit fluidisé ( $Al_2O_3+N_2$ ) et le four sous vide. Il importe que la pièce à tremper soit échauffée progressivement et régulièrement. Les meilleurs résultats s'obtiennent, en préchauffant lentement jusqu'à 600-650° C puis, en échauffant rapidement à la température de trempe. La pièce doit être soumise à cette température suffisamment longtemps, afin que la chaleur soit uniformément atteinte dans toute sa section. L'exposer trop longtemps a une influence défavorable sur la finesse du grain. De grandes pièces nécessitent des températures légèrement plus élevées, raison pour laquelle, les aciéries indiquent un intervalle (p.e. 760 à 790° C) au lieu d'une seule valeur fixe, propre à chaque nuance. Sortie du four, on plonge *immédiatement* la pièce dans le fluide de trempe et cela dans le sens longitudinal, perpendiculaire à la surface du bain de trempe, afin d'éviter la déformation. Des pièces asymétriques doivent être immergées de façon que, leur plus grande masse, ait en premier lieu le contact avec le fluide de trempe. Il importe non seulement de plonger l'outil dans ce dernier, mais encore de le remuer vivement, afin d'obtenir son contact régulier et intense (bulles de vapeur). Au four sous vide le bien de trempe est refroidi par l'azote sous pression. La superficie de pièces trempées sous vide est brillante et nette.

*Tout danger* doit être contrôlé par une atmosphère réductrice, afin que le carbone ne se consume pas à la superficie de l'acier. Alors que, dans un four de trempe moderne (avec installation de gaz protecteur) cet état règne, dans le four à moufle sans gaz protecteur, l'atmosphère protectrice doit être créée à la superficie de la pièce, ceci, en l'empaquetant, à choix, dans

- une feuille d'acier inoxydable ajustée à sa superficie
- du papier de journal non imprimé puis, du coke fin, calciné et/ou du charbon de bois granulé, calciné.

Ceci demande surtout dans le deuxième cas des durées de préchauffe et de maintien prolongées, afin d'assurer l'austénitisation de l'acier jusqu'à cœur.

# Le diagramme TTT

Durant les chapitres précédents, il a été déjà question qu'un acier eutectoïde (C = 0,9%) se compose, à une température de plus de 725° C d'austénite homogène. Cette austénite est stable c.-à-d., elle ne se transforme pas avec le temps. Le chapitre dernier a fait état de refroidissements rapides de l'austénite sensiblement au-dessous du point de transformation normal (725° C) mais, cette dernière ainsi refroidie demeure instable.

Une étude approfondie de la transformation structurale permet le diagramme TTT (Temps, Température, Transformation) nommé souvent «courbe en S». Ce diagramme TTT fixe les phases de transformation de l'austénite refroidie, à des températures différentes, en fonction du temps. Afin d'obtenir un diagramme intuitif et compréhensible, il y a lieu de tracer les processus en question et d'établir un «graphique particulier». En effet, il s'agit de retenir dans ce dernier les phases susdites se déroulant soit, en quelques secondes, d'autres en plusieurs minutes ou heures voire, même fort lentement. Ce graphique particulier doit permettre de fixer les processus dans un cadre acceptable où il y a en abscisse les intervalles de temps en une échelle d'une division graduelle non linéaire mais *logarithmique* c.-à-d., les valeurs à inscrire sur la ligne horizontale ne sont pas:

1 seconde	2 secondes	3 secondes	4 secondes	5 secondes
mais				
1 seconde	10 secondes	10 <sup>2</sup> secondes (100)	10 <sup>3</sup> secondes (1000)	10 <sup>4</sup> secondes (10'000)

Ce système représente une sorte de perspective, traçant en raccourci, des processus se réalisant dans un temps de plus en plus éloigné. Afin de faire saisir clairement le principe du diagramme TTT, il s'agit de l'expliquer ci-après à l'aide de quelques essais bien déterminés, de façon semblable que l'a été précédemment le diagramme fer-carbone.

Diagramme d'un acier eutectoïde (C = 0,9%)

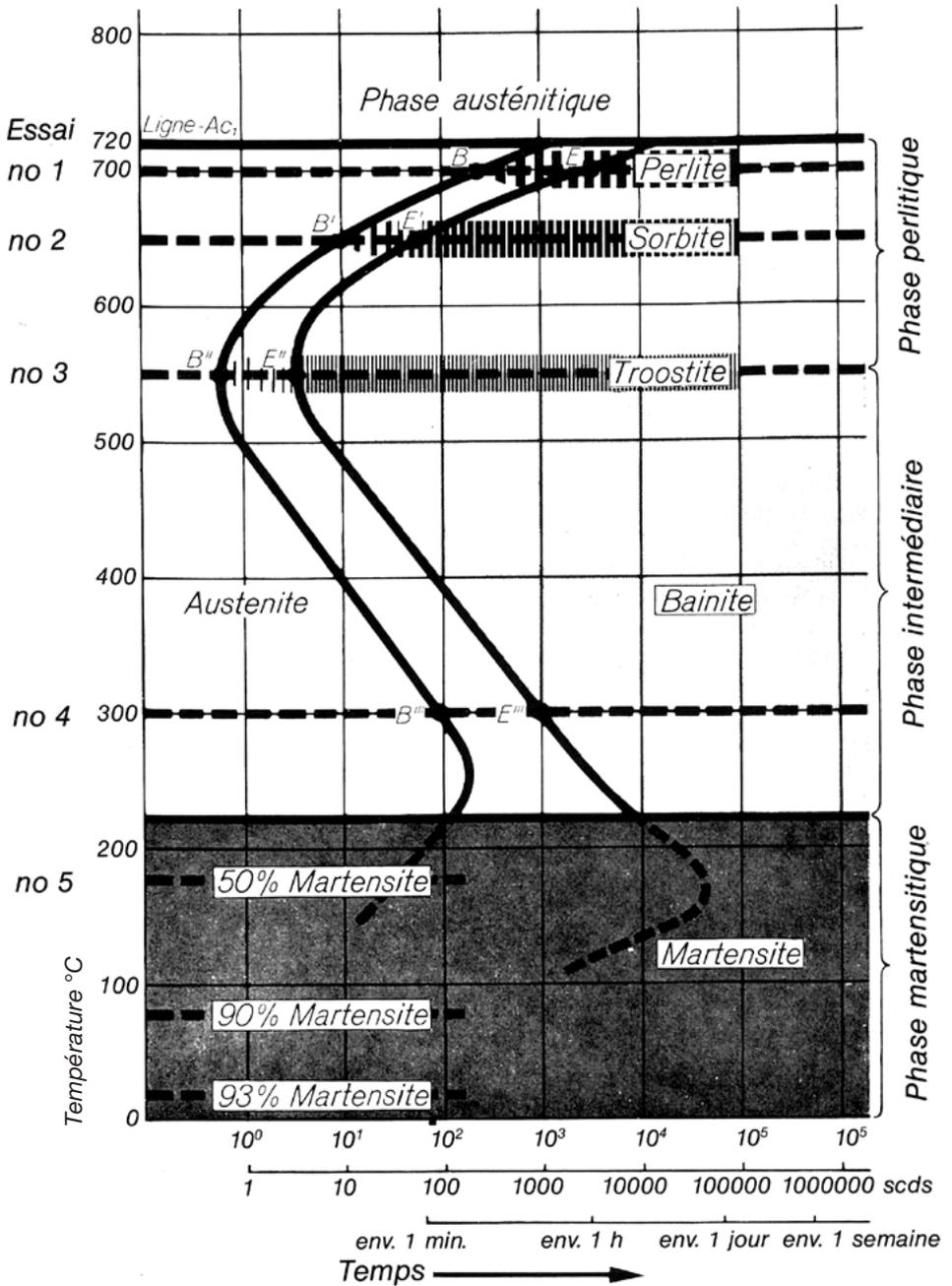


Fig. 10

## Essai no 1

Une éprouvette ( $C = 0,9\%$ ) est échauffée à la température normale de trempage c.-à-d., environ  $50^\circ$  au-dessus de la ligne  $Ac_1$  puis refroidie subitement à  $700^\circ$  C et maintenue à cette température. Observons la réaction de l'austénite ainsi refroidie.

Au point B c.-à-d., après environ 240 secondes seulement (*temps de mise en train*) commence la précipitation du carbure de fer sous forme de lamelles avec la transformation simultanée d'une quantité correspondante de fer gamma en fer alpha alors que, l'agrégat austénitique demeurerait homogène jusqu'ici. Cette transformation débute donc au point B, après environ 240 secondes et se termine seulement au point E, après environ une heure. Notons donc, à  $700^\circ$  commence la transformation, après un temps de mise en train d'environ 4 minutes, d'une durée de près d'une heure (56 minutes). La structure cristalline formée est la *perlite lamellaire* à striures larges.

## Essai no 2

Éprouvette trempée à  $650^\circ$  C et maintenue à cette température. Après le temps de mise en train de 10 secondes seulement, débute au point B' la dissolution de l'austénite refroidie par précipitation du carbure de fer et transformation du fer gamma en fer alpha, analogue aux observations faites lors du premier essai. Mais, cette fois-ci, la transformation évolue bien plus rapidement et se termine au point E' après 65 secondes (à compter depuis le début du refroidissement). Le processus de transformation proprement dit se réalise dans l'espace de 55 secondes environ. La structure cristalline formée est une perlite à lamelles très fines, par manque de temps afin de grossir. Cette perlite est également appelée *sorbite de trempage*.

## Essai no 3

Éprouvette trempée à environ  $550^\circ$  C. Ici, la transformation se réalise extrêmement vite. Après un temps de mise en train de moins d'une seconde débute la transformation au point B". Environ 3 secondes plus tard (E") toute l'austénite refroidie est transformée par un processus identique à celui observé lors des essais nos 1 et 2, en une perlite à lamelles très fines et pratiquement sans texture, appelée *troostite de trempage*.

En résumé, on peut dire que le principe de transformation de l'austénite refroidie jusqu'à environ  $550^\circ$  C reste toujours le même, tandis que par refroidissement progressif (température chutante de transformation) les temps de mise en train et de transformation diminuent fortement. La structure cristalline d'une perlite à lamelles larges devenant celle sans texture (troostite de trempage). Toute cette zone est appelée *phase perlitique*.

## Essai no 4

Eprouvette trempée à environ 300° C. Il est frappant que le temps de mise en train est de nouveau beaucoup plus long. Après environ 100 secondes seulement l'austénite fortement refroidie commence sa dissolution, cela d'après un principe qui diffère fondamentalement de celui de la phase perlitique, où, la dissolution de l'austénite commence par la précipitation du carbure suivie de la transformation du fer gamma en fer alpha. Ici, la transformation du fer gamma en fer alpha (semblable à la transformation martensitique) précède la dissolution par précipitation du carbure de fer, qui, lui se précipite sans tarder sous une forme extrêmement fine. Lors de ce processus, ne se réalisant pas de façon apoplectique conforme à la transformation martensitique mais, progressant plutôt lentement, le réseau spatial alpha se déforme fortement créant une structure cristalline d'une dureté sensiblement supérieure à celle de la phase perlitique. Sa désignation est *bainite*.

On nomme phase intermédiaire, l'ensemble de la zone entre 550° C et la ligne martensitique, qui, elle se trouve pour l'acier eutectoïde à environ 220° C.

Les processus de transformation sont dans toute la phase intermédiaire les mêmes. Plus la température de transformation est basse, plus le temps de mise en train est long et plus lentement se réalise la transformation proprement dite. On peut également observer que, plus la température de transformation est basse, plus la précipitation des carbures est incomplète et plus la structure créée est dure.

## Essai no 5

Eprouvette trempée à environ 180° C. Ils se forment, de façon *apoplectique*, environ 50% de la martensite, alors que les autres 50% subsistent en austénite. Il importe de faire remarquer que, dans la phase martensitique, la formation de la nouvelle structure cristalline se réalise de façon *apoplectique* donc; sans aucun temps de mise en train. Ceci, contrairement aux processus de transformation susdits de la phase perlitique et celle intermédiaire lors desquelles la transformation se réalise progressivement, à une température constante, formant d'une structure 100% austénique une telle 100% nouvelle. La part de la structure transformée, c.-à-d. de la martensite formée, lors de l'essai no 5, dépend de la température de trempé et atteint pour un acier eutectoïde environ 50% à 180°, environ 80% à 80° C et environ 93% à la température ambiante. Or, l'acier de 0,9% C parfaitement trempé contient encore environ 7% d'austénite résiduelle.

Les aciers alliés peuvent présenter un taux d'austénite résiduelle très important et sa transformation en martensite nécessite l'application de températures de trempé sensiblement au-dessous de 0° C.

L'étude du diagramme TTT, telle que spécifiée jusqu'ici, concerne seulement l'acier au carbone eutectoïde (= 0,9% C). Tout changement du teneur en C et surtout des éléments d'alliage modifient les courbes grandement. Ci-après, quelques diagrammes TTT relatifs à différentes qualités d'acier reçoivent une brève explication.

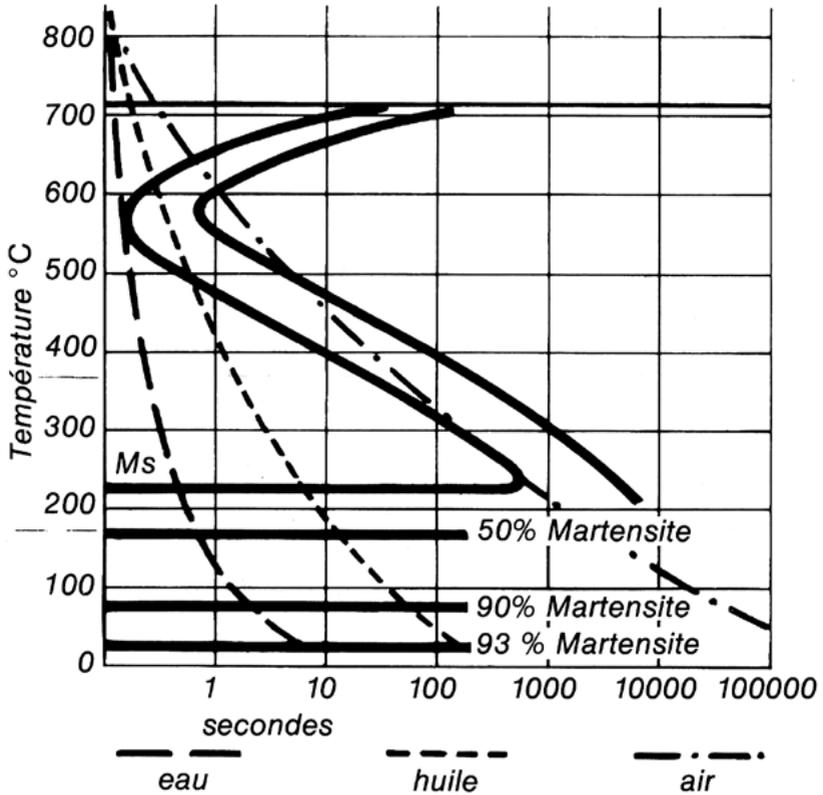


Fig. 11

Diagramme typique d'un acier d'environ 1% de carbone (fig. 11). Dans la zone des 550° C, l'austénite est très instable. La dissolution débute après des fractions de secondes. Point martensitique à environ 220° C. Le refroidissement jusqu'à la température ambiante permet d'obtenir environ 93% de martensite, donc très peu d'austénite résiduelle.

Dans le diagramme sont inscrites: Les courbes de refroidissement pour la trempe à l'eau, à l'huile et à l'air. Logiquement, ces courbes dépendent fortement des dimensions (volume) de la pièce à tremper.

Cet acier est uniquement trempable à l'eau. Une trempe à l'huile transforme environ 50% d'austénite en perlite (troostite) dans la zone des 550° C et les autres environ 50% seulement en martensite à une température inférieure à 220° C, ayant pour conséquence une dureté insuffisante. Par trempe à l'air, il y a dissolution totale de l'austénite dans la zone des 550° C c.-à-d., transformation en perlite (100%), dureté nulle.

Afin de diminuer les tensions de trempe à l'eau, la trempe de cet acier peut être interrompue à une température d'environ 300° C puis, poursuivie à l'huile jusqu'au refroidissement total. Ce procédé est évidemment incontrôlable et sans sécurité car, la prise de dureté reste incertaine.

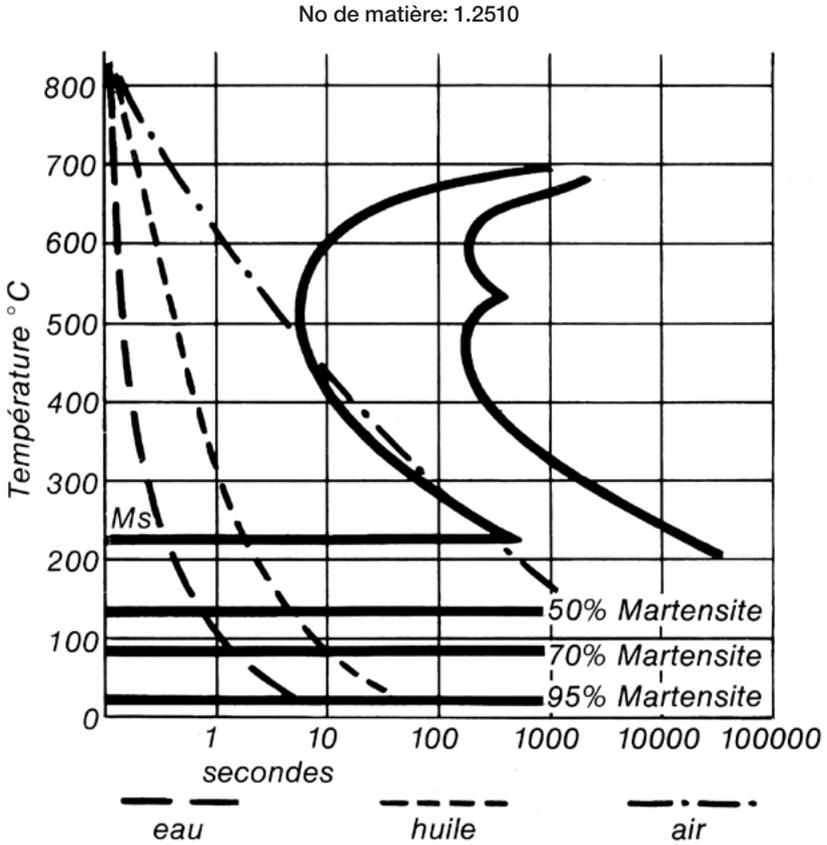


Fig. 12

Diagramme TTT d'un acier parfaitement trempable à l'huile (fig. 12). Dans la zone perlitique, l'austénite est sensiblement plus stable que celle d'un acier purement au carbone. La dissolution débute après environ 6 secondes seulement. Le refroidissement à l'huile ne provoque aucune dissolution prématurée dans la zone perlitique. Formation martensitique à partir d'environ 220° C et son taux atteint à la température ambiante environ 95%. Le refroidissement à l'air provoque une dissolution partielle de l'austénite dans la phase intermédiaire, avec dureté finale réduite.

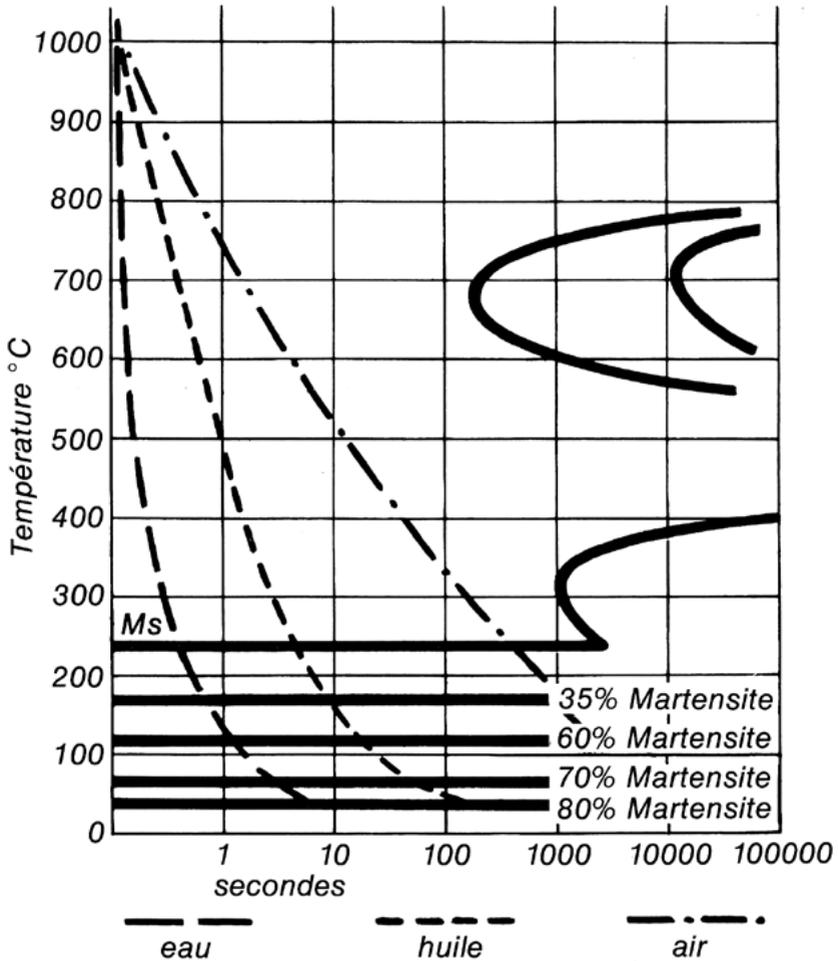


Fig. 13

Diagramme TTT typique d'un acier trempant à l'huile ou à l'air (fig. 13). Phase perlitique à une température élevée (environ 750–650° C). A ce niveau, l'austénite est sensiblement plus stable, avec un temps de mise en train d'environ 2 minutes et un temps de transformation totale de plusieurs heures. Ni durant la trempe à l'huile, ni durant un lent refroidissement à l'air (petites sections) jusqu'à la phase martensitique, aucune dissolution de l'austénite ne se réalise. Début de la formation martensitique à environ 220° C. A la température ambiante environ 80% de martensite sont formés. Il subsiste une part importante d'austénite résiduelle (environ 20%). Plus la température de trempe est élevée, plus la part d'austénite résiduelle est importante.

L'austénite résiduelle subsistante dans le bien de trempe se transforme avec le temps en martensite (nouvelle). Cette martensite d'un volume plus grand que l'austénite change les dimensions de la pièce trempée. Pour cette raison, les aciers hautement alliés sont à revenir au moins trois fois dans la plage secondaire (au-dessus de 500° C), ceci pour la transformation presque totale de l'austénite résiduelle en martensite revenue. Puisque beaucoup d'aciers achèvent la transformation martensitique bien au-dessous de 0° C, un traitement sub-zéro est à recommander, c.-à-d. de suite après le refroidissement ambiant, les pièces doivent être refroidies par étages successivement à -80° C (optimal -180° C).

La connaissance du diagramme TTT permet de comprendre sans difficultés le principe de la trempe par étage. Lors de la trempe ordinaire, il est inévitable que les couches extérieures d'une pièce, se refroidissant plus rapidement que celles intérieures, se transforment en martensite tandis que le cœur subsiste encore en austénite. La transformation de l'austénite en martensite entraîne une augmentation du volume. Or, durant la transformation progressant vers le cœur, de fortes tensions naissent dues à l'augmentation du volume et en rapport avec les couches extérieures déjà dures et inélastiques.

En cas de trempe étagée, cet acier demande un refroidissement à une température légèrement au-dessus du point martensitique et d'un maintien juste nécessaire à la compensation de température entre la surface et le cœur. Il est reconnu qu'à ce niveau de température l'austénite demeure assez stable. Après le retrait de la pièce à tremper du bain chaud, la poursuite de son refroidissement lent permet une transformation martensitique simultanément dans ses couches extérieures et intérieures. Par ce procédé, le danger de fissuration est pratiquement supprimé et la déformation se réduit au strict minimum.

La pratique de cette méthode a pour condition que, la vitesse de refroidissement, réduite par la température élevée du bain chaud, soit suffisante permettant de traverser la zone critique de la phase perlitique, afin d'éviter une dissolution partielle d'austénite entraînant une diminution de la dureté finale. La température du bain chaud, sa conductibilité thermique et le volume de la pièce ont une influence décisive sur la vitesse de refroidissement. Plus le volume de la pièce est grand, plus de la chaleur s'accumule, plus son refroidissement est lent.

# Le revenu

Après trempe, l'acier est à sa dureté extrême très fragile ne convenant pas dans la plupart des applications. Afin de réduire les grandes tensions et de rendre à la pièce une ténacité minimale, il y a lieu de chauffer l'acier, immédiatement après trempe, à une température entre 100 et 650° C suivant application. Ce traitement se nomme le *revenu*.

Les processus dans la structure sont simples et à ce niveau d'étude facile à comprendre. Jusqu'à environ 100° C, la structure martensitique reste inchangée à savoir, en un cristal cubique alpha déformé par le carbure de fer enfermé. Entre 100° et 200° C la martensite déformée se transforme lentement en fer cubique alpha présentant un réseau quadratique provoqué par le carbure de fer toujours enfermé. A environ 250° C, début de diminution sensible de la dureté, commence une précipitation du carbure finement réparti. A ce même niveau de température, il y a dissolution de l'austénite résiduelle dans la bainite.

Avec la progression successive de la température, le carbure subit un grossissement des grains et il y a ensuite la formation d'une structure perlitique à travers les phases troostite et sorbite jusqu'à peu au-dessous du point de transformation  $Ac_1$  (725° C). Cette perlite est composée de la ferrite et de la cémentite à grains fins (contrairement à la cémentite lamellaire).

Tous ces changements ne se réalisent pas subitement mais, par *températures* et *durées de revenu* progressives. A une température de revenu bien déterminée, une pièce peut présenter *simultanément* de la martensite, de la troostite de revenu et de la sorbite de revenu, cette dernière à condition que la température de revenu soit suffisamment élevée. Plus la durée de revenu est longue, plus la martensite se transforme en troostite de revenu et cette dernière en sorbite de revenu. Ceci permet de constater que la *diminution de la dureté* au revenu dépend non seulement de la *température de revenu* mais, également de la *durée de revenu*.

Le revenu s'exécute le plus souvent dans des fours spéciaux de revenu ou directement au four sous vide (de suite après le refroidissement). Les températures de revenu sont fréquemment jugées à l'aide de leurs couleurs de revenu. Lors de l'échauffement d'une surface polie blanche se forme une couche d'oxyde, dont l'épaisseur augmente avec l'accroissement de la température et occasionne un changement de couleur.

200° C .....	blanc cassé	280° C .....	violet
220° C .....	jaune paille	300° C .....	bleu foncé (bluet)
240° C .....	jaune or	320° C .....	bleu clair
260° C .....	rouge brun	340° C .....	gris bleu

Tenant compte que l'épaisseur de la couche d'oxyde ainsi que la couleur dépendent de la durée de revenu, ce procédé de détermination de la température se révèle problématique. Par exemple, un acier échauffé suffisamment longtemps à une température de 280° C, au stade ayant traversé rapidement la gamme de couleur du blanc cassé au violet, couleur subsistante momentanément mais, passant avec l'apport du temps au bleu, puis au bleu clair, etc. Toutefois, la situation n'est pas si grave car, la structure ainsi que la diminution de la dureté sont non seulement influencées par la température mais, de façon identique, également par la durée. Ainsi, la couleur de revenu n'est pas un moyen sûr de détermination de la température mais, elle permet de constater, avec une sécurité suffisante, toute diminution de la dureté.

Afin d'éviter tout malentendu, le tableau susmentionné des couleurs de revenu n'est valable que pour des aciers au carbone et des qualités à alliage faible. Aux aciers hautement alliés leurs couleurs de revenu respectives correspondent à des températures plus élevées. Ceci est particulièrement frappant aux aciers inoxydables, puisque la couche d'oxyde nécessaire à faire apparaître les couleurs de revenu se forme difficilement voire, seulement à des températures élevées.

# L'amélioration

L'amélioration est une trempe à laquelle doit suivre un revenu à haute température, procurant à l'acier une *importante* augmentation de la *ténacité*.

Le plus souvent, les aciers d'amélioration sont livrés par les aciéries à l'état traité, épargnant au consommateur tout traitement thermique. Cependant, l'usinage plus difficile est à sa charge mais, peut-être insignifiant en tournage, rabotage et fraisage.

Le champ d'application des aciers d'amélioration s'étend principalement aux pièces de construction soumises aux efforts élevés tels que, arbres, boulons, bielles, etc.

# La cémentation

Il est souvent nécessaire que des pièces de construction tels que, arbres, roues dentées, etc., présentent une surface dure, résistante à l'usure, tandis que le cœur doit conserver l'élasticité lui permettant d'amortir des chocs et des vibrations. Afin de suffire à ces deux exigences, il s'agit de choisir un acier pauvre en carbone, peu apte à la trempe, puis d'enrichir sa superficie en carbone, lui procurant la trempabilité nécessaire. Lorsqu'une pièce ne doit être que partiellement trempable, il y a lieu de protéger les parties prévues tendres par une couche d'argile réfractaire ou, de cuivre galvanique précipité ou, de pâte spéciale. Ce procédé n'est possible qu'au four à moufle. Dans la pratique, souvent la couche cémentée est ôtée partiellement après cémentation.

La cémentation de l'acier demande des ciments resp. carburants, rendant du carbone ainsi que des additifs en tant qu'intermédiaires. Les ciments resp. carburants se distinguent entre *solides* (granulés, poudres), *liquides* (sels), *gazéiformes* (gaz toxiques au carbone). Leur application est la suivante pour les

- solides:            au four à moufle resp. four à chambre après emballage dans une caisse en acier réfractaire. Les pièces doivent être entourées par le granulé resp. la poudre. Après un échauffement à travers la caisse à 850–900° C, la profondeur de cémentation se calcule à raison de 0,1 mm par heure. Des renseignements concernant le contrôle de l'efficacité des ciments, en rapport avec leur teneur en C et leur durée de cémentation, sont fournis par le commerce avec les produits. Cette méthode ne s'applique à présent plus que sporadiquement.
- liquides:            au sel (creuset). Le cyanite (saumure à base de cyane) rend simultanément du carbone et de l'azote (nitrogène) aux températures de 830–900° C. La profondeur de cémentation dépend de la température et de la durée de cémentation.
- gazéiformes:        dans l'alambic ou, la cémentation des pièces se réalise dans un courant de gaz sous circulation. Des gaz riches en carbone sont appliqués. La teneur en C est contrôlable. La cémentation a lieu à 850–900° C, en respectant des durées de traitement de plusieurs heures, en rapport avec la profondeur de cémentation.

Il est indiqué de ne pas dépasser la teneur superficielle en carbone de 1% car, une carburation plus forte provoque une grande fragilité dans la couche cémentée, nécessitant un recuit doux de longue durée. Les aciers de cémentation alliés au chrome-molybdène et tout spécialement au chrome-manganèse tendent à la surcarburation, contrairement aux aciers au nickel-chrome. Or, ces qualités problématiques doivent être cémentées dans des ciments doux. Il y a également intérêt de limiter la profondeur cémentée au strict minimum, sujet relevé plus loin.

En supposant qu'une pièce soit correctement cémentée, ayant une couche cémentée d'une teneur en carbone ne dépassant le 1% que de peu, à quelle température faut-il tremper? Là, commence la difficulté. Il est établi que, la température de trempe dépend de la teneur en carbone (fig. 9). L'acier présente à cœur environ 0,15% C et à la surface approximativement 1%. Que faire? Il y a lieu de tremper tout d'abord le cœur qui, à 0,15% C, nécessite une température de trempe de 900° C, correspondant à la température de cémentation. Donc, après un brossage du ciment, la pièce peut être plongée dans le bain de trempe. Le temps de refroidissement donne lieu à la réflexion. Le cœur trempé à la température nécessaire doit présenter une structure très fine mais, sans grande dureté, la teneur en C de 0,15% étant insuffisante. Parallèlement, il y a gain de ténacité, donc, une situation propice. Par contre, celle de la surface (couche cémentée), se présente moins bien. Certes, la dureté ne manque pas mais, une teneur en C d'environ 1% demande une température de trempe de seulement 770–800° C, ce qui signifie une forte surchauffe de la couche cémentée, provoquant une grande fragilité. Afin de supprimer cet inconvénient, il s'agit de procéder à une deuxième trempe à 770–800° C, température de trempe de la couche cémentée. Durant cet échauffement, la martensite à grain grossier se transforme d'abord en perlite puis, à 720° C en austénite et lors de la trempe en martensite à grain fin. Pendant ce temps, à cœur il n'y a guère de changement sinon, une perte insignifiante de dureté déjà faible. Conclusion, la double trempe procure à la fois la meilleure structure à cœur et dans la couche recarburée c.-à-d., haute ténacité à cœur, avec une couche superficielle extra-dure sans être trop fragile. Revenir ensuite à 150–200° C.

S'il s'agit de pièces particulièrement compliquées avec risques de déformation, il est conseillé de procéder à un recuit intermédiaire à environ 650° C entre les deux trempes.

Il a déjà été question, qu'il s'agit d'éviter de dépasser le 1% de teneur en C de la couche cémentée. Mais, ce n'est pas rare que, pour des raisons particulières, une profonde couche cémentée est nécessaire et là, il est inévitable que, les aciers tendant à la surcarburation n'atteignent pas, dans leur surface, une teneur en C sensiblement supérieure à 1%. Durant l'étude préliminaire, ce problème a déjà été abordé, ne manquant pas de complication. Une nouvelle étude approfondie doit permettre de comprendre.

Il ressort du diagramme fer-carbone, qu'à la température normale de cémentation de 900° C, 1,2% de carbone seulement se dissolvent dans l'austénite. L'excédent de carbone pénétrant, entoure en réseau grossier l'austénite. Cet état reste stationnaire lors d'une trempe. La cémentite en réseau grossier subsiste même dans la martensite. Durant la deuxième trempe, effectuée d'une température encore plus basse, seulement 1% de C à peine se dissous. Donc, il reste un excédent de cémentite encore plus grand, faisant aggraver la situation.

Dans le chapitre du recuit, il a été constaté que, la cémentite en réseau grossier peut être à la base de fissures de trempe. Ce dernier favorise également l'écaillage de la couche cémentée. L'arme d'affronter ce danger consiste dans la transformation de la cémentite en réseau grossier en cémentite coalescée, par un recuit doux avant la deuxième trempe.

# Aciers alliés

En poursuivant le principe de maintenir le cadre restreint de la présente brochure, la place réservée aux aciers alliés ne peut qu'être limitée. D'ailleurs, il n'a jamais été question de traiter, de façon approfondie, tout ce qui est connu ou non sur l'acier en général. Il s'agit simplement de fournir la réponse à la question initiale, à savoir: *Qu'est-ce que l'acier?*

Il doit être généralement reconnu que, l'alliage de l'acier avec des métaux (manganèse, chrome, tungstène, vanadium, etc.) influence ses propriétés mécaniques de façon réelle et multiple. Il en est de même en ce qui concerne la texture et la transformation structurale. Sans s'occuper de toutes les particularités, seuls trois des principaux indices du domaine des aciers alliés doivent être étudiés ci-après.

Certains éléments d'alliage (manganèse, nickel) diminuent fortement les températures de transformation gamma-alpha tandis que, d'autres (chrome, tungstène, molybdène, silicium) les augmentent. Plus le taux d'alliage est élevé, plus la différence est grande.

Le premier groupe mérite une attention particulière. Lorsque l'acier est suffisamment allié de manganèse respectivement de nickel, sa température de transformation gamma-alpha est tellement basse que, cette transformation ne peut se produire avant d'atteindre la température ambiante. Dans le chapitre de la trempe, il est question que la trempabilité de l'acier réside dans l'empêchement de la transformation normale. En cas de non-lieu de la transformation gamma-alpha avant d'atteindre la température ambiante, cette transformation ne peut être empêchée, signifiant donc la non-trempabilité de l'acier. A cette catégorie appartiennent les aciers, résistants à l'usure, d'un alliage de 12–14% de manganèse et les aciers à haute teneur en nickel, connus en tant qu'aciers inoxydables et réfractaires.

Lors de l'étude des aciers au carbone, il a été constaté qu'un acier de 0,9% C jouit de certains privilèges car, son austénite se transforme en perlite, sans précipitation d'excédents (cémentite ou ferrite). Le point «S» du diagramme fer-carbone est déplacé sensiblement vers la gauche par presque tous les éléments d'alliage, ceci d'autant plus que le taux d'alliage est élevé. Un acier allié de 12% de chrome est déjà hypereutectoïde avec une teneur en carbone de 0,2% seulement. Il est important de retenir cette situation car, les aciers hypereutectoïdes demandent un recuit très soigné.

L'influence capitale des éléments d'alliage, sur les propriétés de l'acier, réside tout particulièrement dans la diminution de la vitesse critique de refroidissement. Dans le chapitre de la trempe, il est question que la vitesse de refroidissement peut atteindre une certaine valeur critique, permettant d'empêcher une précipitation prématurée du carbure de fer hors du cristal gamma, créant l'état de contrainte, appelé «dureté». Dès lors, il est aisément compréhensible qu'avec la présence d'autres éléments d'alliage en solution solide gamma, ces derniers faisant barrage au carbure de fer, prolongeant sensiblement sa précipitation hors du cristal gamma. De ce dernier, il ne réussit déjà plus de se précipiter en temps utile de libération, dans le cas d'une vitesse de refroidissement relativement lente. Petite vitesse de refroidissement égale trempe plus douce. Ceci explique l'acier pour la trempe à l'huile respectivement à l'air. Ci-après encore une autre conséquence. La trempe à l'eau d'un acier au carbone représente une vitesse de refroidissement suffisante, afin d'atteindre, à sa superficie, l'état martensitique alors que, son cœur demeure tendre, dû à son refroidissement plus lent. Donc, le refroidissement à cœur n'atteint plus la vitesse critique. Par contre, la présence de certains éléments d'alliage dans les aciers alliés suffit d'atteindre leur plus petite vitesse critique, même à cœur, qui est soumis à une vitesse de refroidissement réduite. L'acier trempe intégralement.

Ces explications brèves suffisent de démontrer que, des éléments d'alliage peuvent diriger et influencer les transformations structurales. Les processus de transformation d'un alliage à composants multiples se révèlent réellement plus compliqués que ceux d'un alliage binaire (fer-carbone), situation déjà étudiée. Quelques soient ces processus en détail et encore après modification jusqu'à l'état de la méconnaissance du diagramme fer-carbone, les principaux processus demeurent les mêmes. Il importe de connaître, avant tout, les phases élémentaires de transformation dans l'acier durant son traitement thermique.

Il s'agit maintenant de tenter, bien que problématique, une petite étude de l'influence des principaux éléments d'alliage, au niveau des propriétés de l'acier. Ceci sous forme d'indices de direction que peuvent influencer chacun des éléments d'alliage les propriétés de l'acier. Pas trop de conclusions optimistes car, les effets issus de chacun de ces éléments d'alliage ne s'additionnent pas.

Autrement dit, l'adjonction à un acier de l'alliage A lui conférant la propriété 1 et celle de l'alliage B la propriété 2 ne signifie pas forcément l'addition des propriétés 1 et 2 pour un acier allié A plus B. De plus, une bonne propriété conférée à un acier par un alliage d'un pour-cent, ne se trouve pas sans faute multipliée par dix, lorsque le taux d'alliage l'a été. Cependant, par l'augmentation du taux d'alliage, il y a presque toujours gain en *nouvelles* propriétés.

## **Le soufre et le phosphore**

Tous les aciers contiennent une faible proportion de soufre (S) et de phosphore (P). Il ne s'agit pas d'éléments d'alliage mais, simplement d'impuretés provenant du minerai et restées dans l'acier lors de son élaboration. Les aciéries font de grands efforts afin de diminuer, au strict minimum, la teneur en soufre et en phosphore de leurs produits.

Une proportion sensible de soufre provoque une grande fragilité à chaud de l'acier. Dans certaines qualités d'acier (aciers pour automates) la teneur en soufre est intentionnellement augmentée, afin de faciliter l'usinage. Mais, cet avantage ne s'acquiert qu'au détriment de la qualité de l'acier.

Le phosphore rend l'acier fragile à froid.

## **Le manganèse**

Un faible additif de manganèse (Mn) se trouve dans tous les aciers, indispensable à leur élaboration. Toutefois, on ne parle d'acier au manganèse qu'au moment d'une teneur suffisamment élevée, pouvant influencer notablement ses propriétés (dès 0,5–0,6%). La teneur croissante en manganèse diminue fortement la température nécessaire à la transformation gamma-alpha. L'acier allié de 12% de manganèse demeure austénitique, même à la température ambiante c.-à-d., il n'est donc pas trempable. Ces aciers sont très résistants à l'usure mais, ils sont difficilement usinables, en principe seulement par meulage, érodage, oxy-coupage, éventuellement par Laser. Formage à froid (étirage, martelage, travail de choc) durcit ces aciers très forts. Ainsi, leur application comprend des masses de concasseurs, boulons de drague, etc.

Une teneur relativement faible en manganèse réduit déjà fortement la vitesse critique de refroidissement. Par conséquent, des aciers alliés de 1–1,2% de manganèse sont trempables à l'huile.

## **Le silicium**

Du silicium (Si) se trouve dans tous les aciers. Mais, il n'est question d'aciers alliés au silicium, qu'à partir d'une teneur d'au moins 0,4%. Le silicium augmente la résistance à la traction et la limite élastique de l'acier en lui conférant une structure quelque peu à gros grain, quoique souple (aciers à ressort).

Semblable au manganèse, cet élément d'alliage diminue la vitesse critique de refroidissement. Les aciers alliés au silicium offrent une bonne trempe intégrale.

## Le chrome

Le chrome (Cr) déplace le point «S» du diagramme fer-carbone fortement vers la gauche. Précédemment, il a été dit, qu'un acier allié de 12% de chrome est déjà hypereutectoïde dès 0,2% C (Recuit doux).

Le chrome forme particulièrement beaucoup de carbures c.-à-d., dans les aciers à haute teneur de chrome, il y a du carbure de fer (cémentite) et également des carbures de chrome. Ces derniers sous forme de matière extrêmement dure faisant augmenter la dureté de l'acier. Le rendement de coupe et la résistance à l'usure sont favorablement influencés.

Le chrome affine le grain.

Il diminue la vitesse critique de refroidissement. L'acier au chrome trempe intégralement tout en étant trempable à l'huile même, à un faible taux d'alliage (1,5%).

L'acier allié d'au moins 13% Cr et de moins de 0,6% C est plus ou moins inoxydable à l'état trempé et revenu.

## Le tungstène

Le tungstène (W) déplace, de façon semblable au chrome, le point «S» du diagramme fer-carbone vers la gauche. Les aciers rapides de 18% W et d'environ 0,7% C sont déjà hypereutectoïdes, malgré qu'une part relativement importante du carbone soit nécessaire à la formation des carbures de tungstène, chrome et vanadium. Ainsi donc, il subsiste sensiblement moins de 0,7% C encore disponible à la formation du carbure de fer (cémentite).

Le tungstène facilite la formation des carbures, faisant augmenter la dureté, le rendement de coupe et la résistance à l'usure.

La vitesse critique de refroidissement n'est que faiblement diminuée par le tungstène. Ainsi, les aciers au tungstène, proprement dit, sont trempables à l'eau.

Le tungstène affine le grain et rend l'acier résistant au revenu. Suivant leur teneur d'alliage, les aciers au tungstène trempés permettent un échauffement à une température assez élevée, sans grand perte de leur dureté (aciers rapides et aciers pour le travail à chaud).

Ces aciers n'ont qu'une faible tendance à présenter une structure à gros grain et sont, par conséquent, relativement insensibles à la surchauffe. L'allongement n'est diminué que de peu par le tungstène, or, ces aciers sont plus tenaces que ceux au chrome.

Le tungstène confère à l'acier de bonnes propriétés magnétiques.

## **Le molybdène**

Le molybdène (Mo) influence l'acier de façon semblable au tungstène mais, dans une mesure plus forte. Il forme beaucoup de carbures. Le point «S» est fortement déplacé à gauche. Le molybdène augmente la résistance à la rupture, la limite élastique et surtout la résistance à la fatigue (aciers de construction). Ces aciers sont assez insensibles à la surchauffe, n'ayant aucune tendance à la formation de gros grains.

Le Mo augmente la résistance au revenu.

## **Le vanadium**

Le vanadium (V) influence l'acier de façon semblable mais, plus accentuée que le molybdène. Très forte formation de carbures. Les aciers alliés au vanadium demandent une teneur relativement élevée en carbone, dont une grande partie se trouve liée au vanadium, pouvant réduire la part nécessaire à la matrice jusqu'à la mise en cause de sa trempabilité.

Le vanadium augmente considérablement le rendement de coupe et la résistance à l'usure. Il rend l'acier insensible à la surchauffe. La résistance à la rupture et la limite élastique sont augmentées par le vanadium, sans diminution de l'allongement. Important pour aciers de construction.

Le vanadium rend l'acier insensible aux chocs.

## **Le cobalt**

Le cobalt (Co) est sans grande influence sur la structure. Ni, le point «S» se trouve fortement déplacé ni, la vitesse critique de refroidissement est diminuée.

En tant qu'élément d'alliage, le cobalt n'est utilisé qu'en liaison avec d'autres composants (tungstène, chrome, etc.), en influençant très favorablement la résistance à l'usure par une dureté à chaud plus élevée p. e., aux aciers rapides.

Le Co freine la formation de gros grains. Les propriétés magnétiques sont favorablement influencées par le cobalt.

## **Le nickel**

Le nickel (Ni) abaisse fortement la température de transformation gamma-alpha. Les aciers à haute teneur en nickel (aciers inoxydables et réfractaires) sont austénitiques c.-à-d., la transformation gamma-alpha ne peut s'effectuer jusqu'à la température ambiante (non-trempables).

La vitesse critique de refroidissement est fortement abaissée par le nickel. De plus, les aciers au nickel trempent plus profondément. Ils sont trempables à l'huile ou à l'air. Le nickel affine le grain et augmente ainsi la résistance de l'acier.

De par leurs propriétés mécaniques, les aciers au nickel sont très utilisés en tant qu'aciers de construction, en particulier, en aciers de cémentation ou de traitement pour des pièces de machines fortement sollicitées (engrenages, cames, chevilles).