

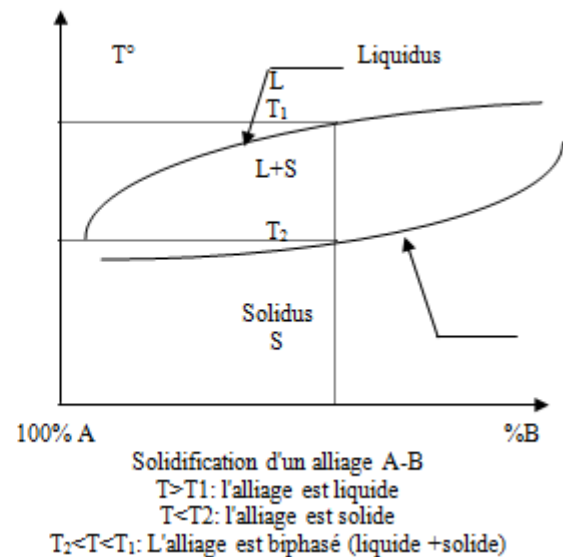
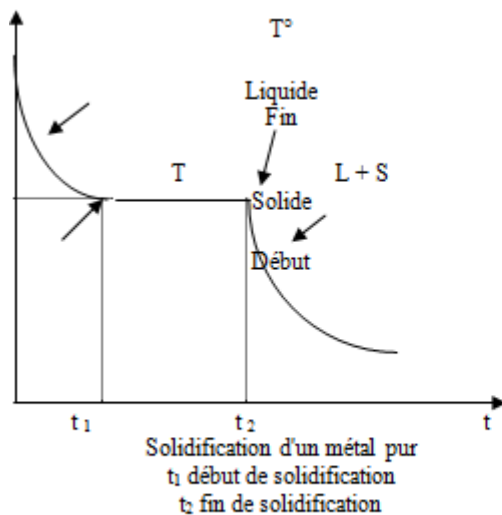
DIAGRAMMES D'EQUILIBRE DES ALLIAGES BINAIRES

1. Généralités:

Un métal pur se solidifie à température constante mais un alliage ne se solidifie pas généralement à température constante. En effet la solidification débute à 1 température T_1 et termine à une température $T_2 < T_1$, la solidification a lieu dans un intervalle de T° . Les lieux géométriques des températures T_1 et T_2 sont appelés respectivement "Liquidus" (T_1) et "Solidus" (T_2).

Au dessus du liquidus, l'alliage est liquide, au dessous du solidus l'alliage est solide. Entre le liquidus et le solidus, l'alliage est biphasé (Solide + Liquide).

A l'état solide, l'alliage peut présenter des transformations, les lieux géométriques de ces points de transformation + le liquidus et le solidus forment le diagramme d'équilibre de l'alliage qui est présenté dans un plan (T° , c%).



2. Loi des phases (Loi de Gibbs):

La variance d'un système en équilibre est donnée par:

$$V = n + 2 - \phi$$

- n correspond au nombre de corps purs constituant l'alliage
- ϕ correspond au nombre de phases présentes dans l'alliage
- 2 correspond aux deux paramètres Pression P et température T

La variance d'un système est égale au nombre de paramètres que l'on peut faire changer arbitrairement sans faire changer la nature ou le nombre des phases en présence. Ces paramètres sont la pression P la température T ou la concentration c.

Remarque: pour une transformation isobare (à pression constante), on tiendra compte uniquement donc de la température la loi des phases sera donc:

$$V = n + 1 - \Phi$$

Exemple: Soit un système composé par deux phases solides (Fe et FeO) et une phase gazeuse composée par un mélange de CO et CO₂ la variance dans ce cas sera:

$\Phi = 3$: 2 phases solides et une phase gazeuse

$n = 3$: Le Fer, le carbone et l'oxygène



à pression constante $V = 3 - 3 + 1 = 1$

Remarque:

- $V=0$ le système est dit non variant
- $V=1$ le système est dit monovariant
- $V=2$ le système est dit bivariant

3. Alliage binaire constitué de deux phases en équilibre:

Règle de l'horizontale:

Soit deux métaux M et N de concentration M% et placés à $T^\circ = T$, la règle de l'horizontale permet de déterminer (compte tenu de c et T) la composition de la phase liquide et la composition de la phase solide

Composition de la phase liquide: a% en M et (100%-a% en N)

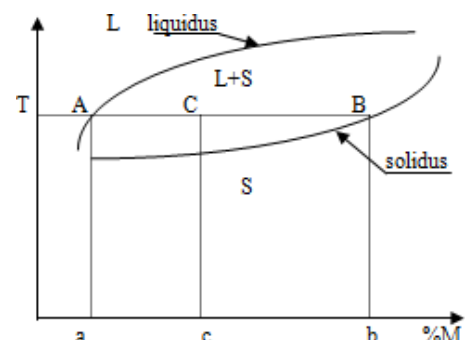
Composition de la phase solide b% en M et (100%-b% en N).

Règle des segments inverses:

La règle des segments inverses, permet de déterminer la proportion de la phase solide et la proportion de la phase liquide

* proportion de la phase liquide: $L\% = (b - c) / (b - a) = BC / AB$

* proportion de la phase solide: $S\% = (c - a) / (b - a) = AC / AB$



4. Alliage à une solution solide unique:

Les métaux sont totalement miscibles à l'état solide: ils forment donc une seule phase dont la composition en chaque métal varie de 0% à 100%. Exemple: Cu Ni, Ag Au, Au Ni... Considérons le cas de l'alliage de Cu Ni à 40% de Ni au cours de sa solidification

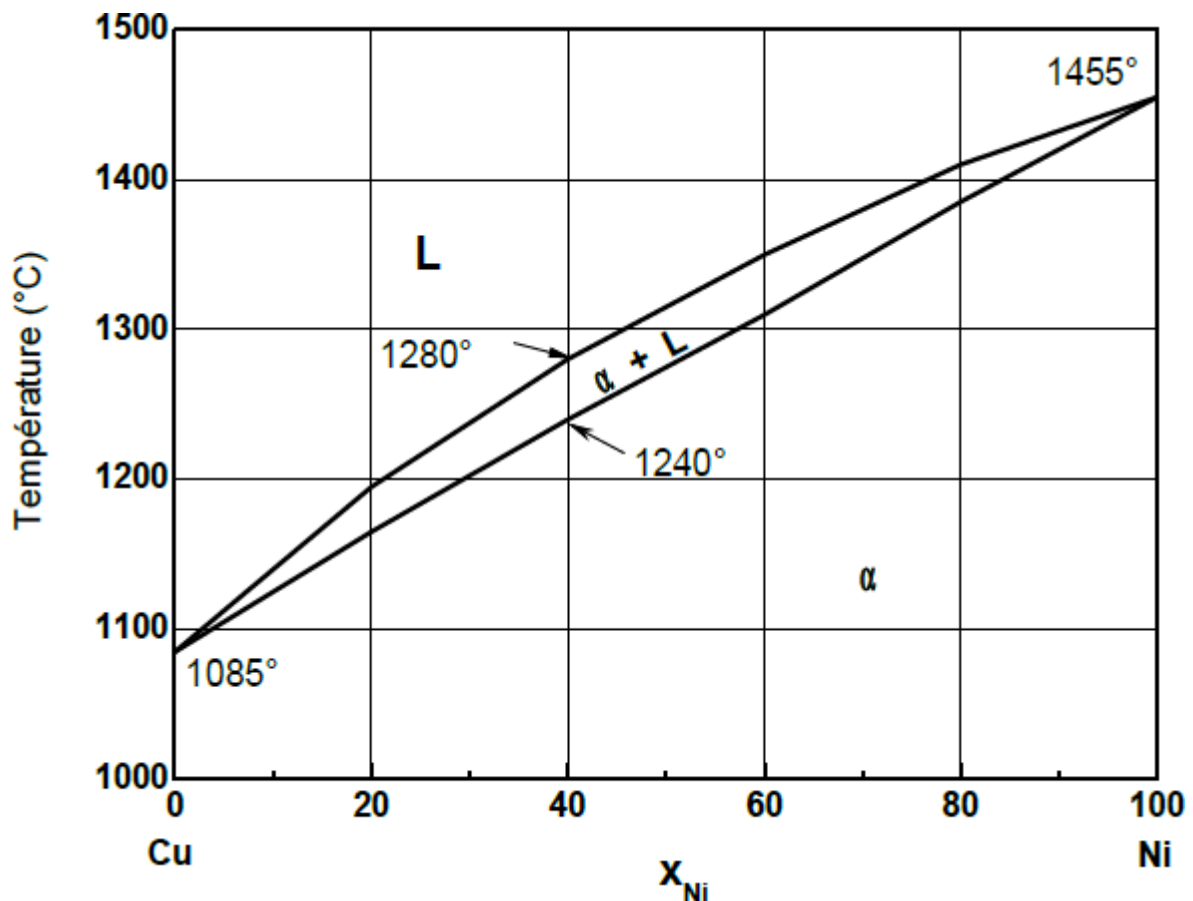


Diagramme de solidification des alliages Cuivre – Nickel

- Vers 1270°C, l'alliage commence à se solidifier, les premiers cristaux se forment, la composition de se solide est donnée par la règle de l'horizontale soit: 56% de Ni et 44% de Cu.
- Vers 1210° C, l'alliage fini de se solidifier, les dernières gouttes de liquide ont la composition suivante: 23% de Ni et 77% de Cu.
- à 1250° C, l'alliage est biphasé (solide+Liquide):

- Liquide % = $(50-40) / (50-35) = 10 / 15 = 67\%$.

- solide % = $(40-35) / (50-35) = 5 / 15 = 33\%$

Remarques: On retrouve la composition nominale de l'alliage

$$\text{Ni}\% = (0,67 \times 0,35) + (0,33 \times 0,5) = 0,4 = 40\%$$

$$\text{Cu}\% = (0,67 \times 0,65) + (0,33 \times 0,5) = 0,6 = 60\%$$

5. Alliage à deux solutions solides avec point eutectique:

□ S_α : solution solide riche M

L

□ S_β solution solide riche en N

□ Le liquidus est constitué de deux branches

obliques, le solidus est constitué de deux branches obliques et une branche horizontale

□ A l'intersection du liquidus et du solidus

(point E), il y'a 3 phases en équilibre: une phase liquide + deux phases solides (S_α et S_β)

100% M

% N

e

100%N

ce point est appelé point EUTECTIQUE:

Liquide $\longrightarrow S_\alpha + S_\beta$

Eutectique signifie qu'il "fond bien" en Grec

Exemple: Diagramme d'équilibre Pb Sn:

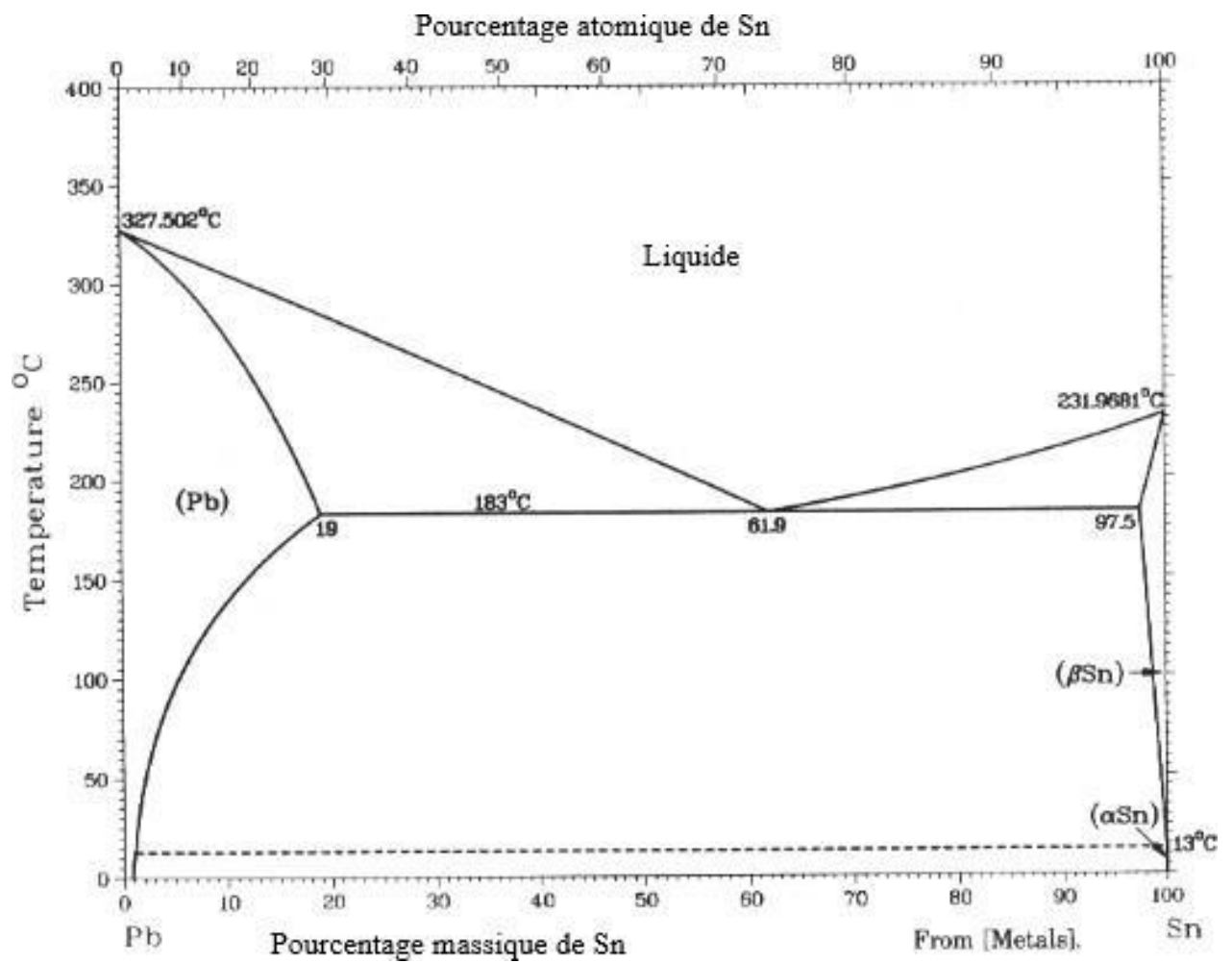


Diagramme de solidification des alliages Plomb – Etain

- Phase α : phase riche en Plomb
- Phase β : phase riche en étain
- Etudions la solidification des alliages Pb Sn ayant diverses concentrations:
- $\text{Sn}\% < 19\%$: cas identique à la solidification des alliages Cu Ni.
- $\text{Sn}\% = 63\%$: formation du mélange eutectique constitué des deux phases α et β
- $\text{Sn}\% > 94\%$: cas identique à $\text{Sn}\% < 19\%$ mais avec la phase β à la place de la phase α
- $19\% < \text{Sn}\% < 63\%$: en dessous de la température T, il y a formation des cristaux riches en Pb

(phase α) dont la composition est donnée par la règle de l'horizontale, lorsque la température diminue la composition du solide augmente de a à e1. Parallèlement la composition de la phase liquide varie de la composition nominale c jusqu'à la composition eutectique e

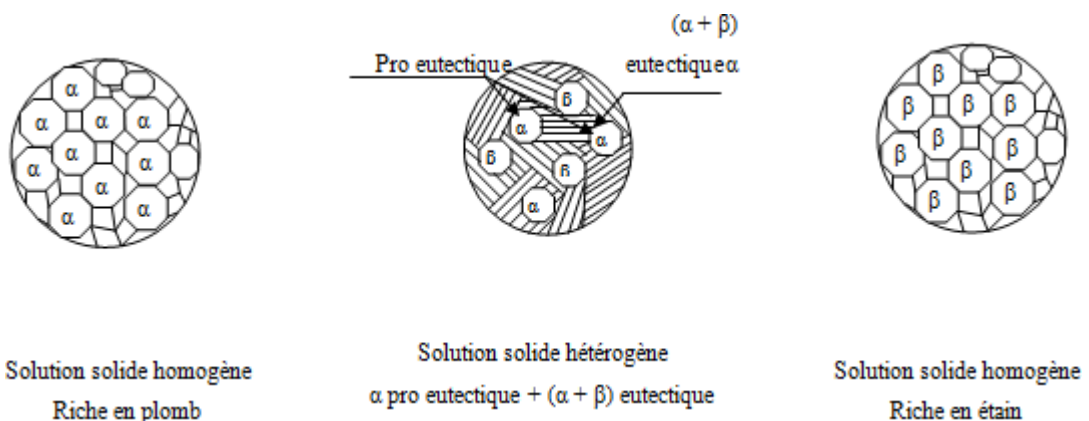
- à $185^\circ \text{C} + \varepsilon$, l'alliage est constitué des deux phases liquides et α

- $L\% = AM / AE$

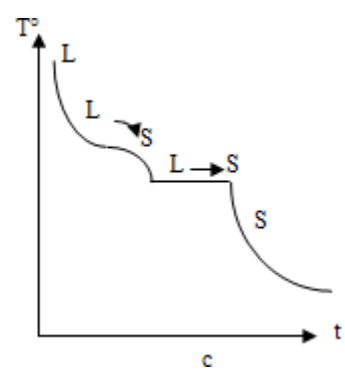
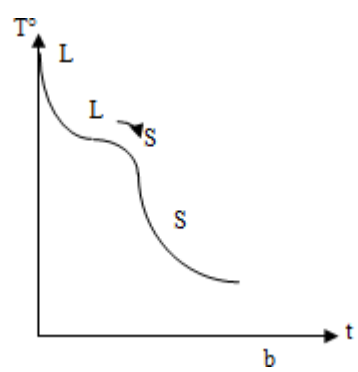
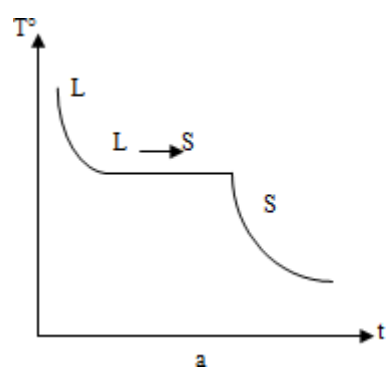
- $S\% = ME / AE$

- à $185^\circ \text{C} - \varepsilon$, l'alliage est solide, il est constitué des deux phases solides α et β : α formé entre le liquidus et le solidus (α pro eutectique) et $\alpha + \beta$ formé par solidification du liquide restant à 185°C .

- $63\% < \text{Sn}\% < 94\%$: cas identique au cas précédent en remplaçant α par β



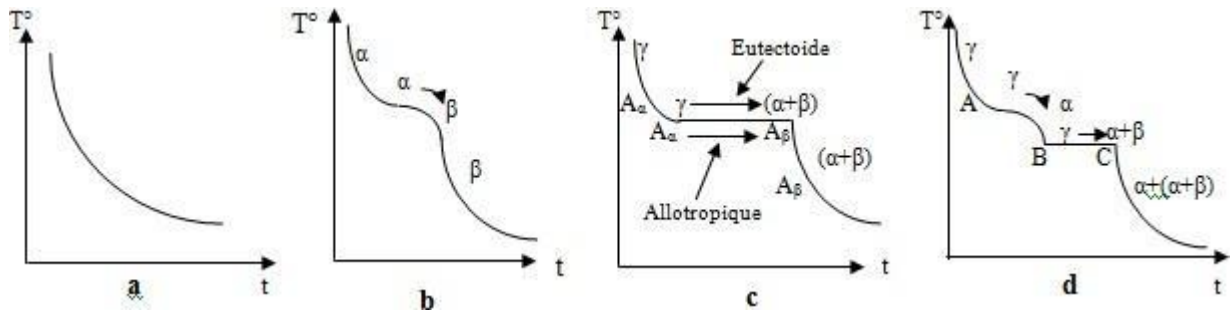
5. Courbes de refroidissement $L \rightleftharpoons S$ d'un alliage:



- a: Identique au cas d'un métal pur. Ce cas est observé au cours de la solidification d'un composé défini ou d'un alliage hétérogène (eutectique).
- b: Correspond au cas de la formation d'une solution solide à partir de l'état liquide.
- c: Correspond à la formation d'une solution solide pro eutectique suivi de la solidification du reste de l'alliage liquide avec formation du mélange solide eutectique

6. Courbes de refroidissement d'un alliage à l'état solide:

On distingue 4 types de courbes:



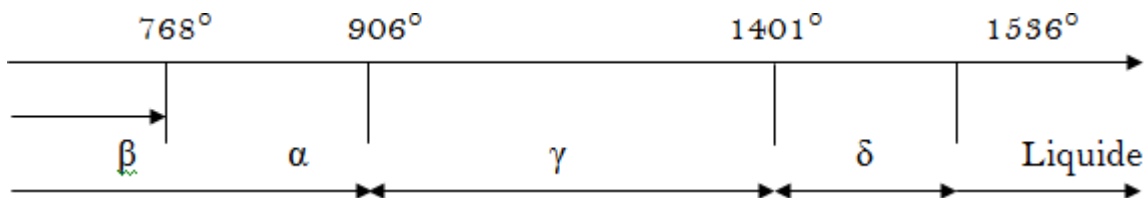
- a – Refroidissement sans transformation.
- b – Transformation d'une solution en une autre phase qui peut être une autre solution solide, un composé défini ou un métal pur.
- c – Transformation allotropique ou eutectoïde.
- e – de A à B une partie de la phase γ se transforme en une phase α pro eutectoïde, de B à C, le reste de la phase γ se transforme en eutectoïde ($\alpha + \beta$)

SYSTEME FER - CARBONE

1. Les aspects du fer et du carbone dans les alliages Fe C:

Rappels des formes allotropiques du fer:

- Jusqu'à 906°C : fer α de structure CC
- $906^{\circ}\text{C} \rightleftharpoons 1401^{\circ}\text{C}$: Fer γ de structure CFC
- $1401^{\circ}\text{C} \rightleftharpoons 1536^{\circ}\text{C}$ fer δ de structure CC
- Jusqu'à 768°C (point de curie), le fer est ferromagnétique, au delà de 768°C il perd son magnétisme il est paramagnétique d'où jusqu'à 768°C phase β



Les formes du carbone dans les alliages Fe C:

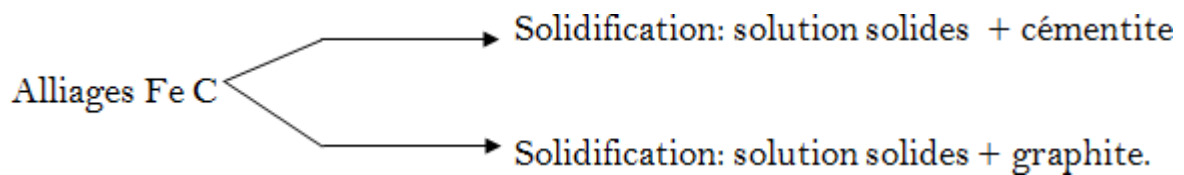
a - Graphite: carbone cristallisé sous la forme hexagonale.

b – Solution solides: il existe 3 sortes de solutions solides dans lesquelles le carbone est toujours placé en insertion. En effet le diamètre d'un atome de carbone est inférieur à celui d'un atome de fer ($\varnothing \text{C} = 1,54 \text{ \AA}$ $\varnothing \text{Fe} = 2,5 \text{ \AA}$)

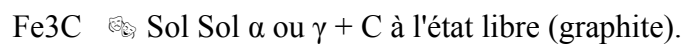
- **Solution solide α :** solution solide d'insertion du carbone dans le fer α appelée "Ferrite α " de concentration maximale 0,02%. Dans la structure CC, les sites interstitiels possibles sont situés aux centres des faces et aux milieux des arêtes mais toutes les positions ne sont pas occupées puisque la concentration maximale est de 0,02%.
- **Solution solide γ :** solution solide d'insertion du carbone dans le fer γ appelée "Austénite γ " de concentration maximale 1,7%. Là aussi toutes les sites interstitiels (milieu des cubes et milieu des arêtes) ne sont pas toutes occupées puisque la concentration maximale est de 1,7%.
- **Solution solide δ :** solution solide d'insertion du carbone dans le fer δ appelée "Ferrite δ " de concentration maximale 0,1%.

c – Carbure de fer : composé défini de formule chimique Fe_3C appelée "Cémentite" d'une concentration en carbone égale à 6,67%.

2. Les deux types de diagramme Fe C:



La formation du graphite ou de la cémentite dépend des conditions de refroidissement et de la nature des éléments d'accompagnement. Par ailleurs, le graphite est un constituant stable alors que la cémentite est un élément métastable (non stable) en effet au chauffage, la cémentite Fe_3C peut se décomposer:



Il existe donc deux diagrammes l'un correspond à un système métastable (diagramme Fe – cémentite), l'autre correspond à un système stable (diagramme Fe – graphite).

Remarque: Le point péritectique (e) et la partie du diagramme située autour ne présente aucun intérêt industriel ou métallurgique. Aussi les diagrammes Fe C sont-ils représentés sous une forme dite simplifiée (voir ces diagrammes page 6/6)

3. Diagramme Fe C métastable simplifié:

- la ligne de transformation à 768°C correspond au point de curie
- La ligne de transformation à 210°C correspond au point de curie de la cémentite.
- La ligne de transformation horizontale E1E2 : ligne de transformation eutectique.

$T \curvearrowright$

Eutectique au point E (4,3% C à 1145°C): Liquide $\rightleftharpoons \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ (Lédéburite)

- La ligne de transformation à l'état solide S1S2: Ligne de transformation eutectoïde.

$T \curvearrowright$

Eutectoïde au point S (0,85% C à 721°C): $\gamma \rightleftharpoons \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (Perlite).

Teneur en carbone	0%	0,85%	1,7%	4,3%	6,67%
Classification	Aciers		Fontes		
	Hypo eutectoïde	Hyper eutectoïde	Hypo eutectique	Hyper eutectique	

Constituants d'un acier

A température ambiante, les constituants des aciers dépendent de leur teneur en carbone. Par contre les phases de ces constituants sont identiques. Ces résultats sont résumés dans le tableau suivant:

Nature de l'acier	Hypo eutectoïde	Eutectoïde	Hyper eutectoïde
Constituants	FERRITE + PERLITE	PERLITE	PERLITE + CEMENTITE
Phases	PERLITE + CEMENTITE		

Composition de la perlite en ferrite et cémentite:

$$\text{Ferrite \%} = \frac{S_2}{S_1 S_2} = \frac{(6,67 - 0,85)}{(6,67 - 0,02)} = 0,875 = 87,5\%$$

La perlite est constituée donc de:

- 87,5% de ferrite perlitique.
- 12,5% de cémentite perlitique.

Lignes et points de transformation des aciers:

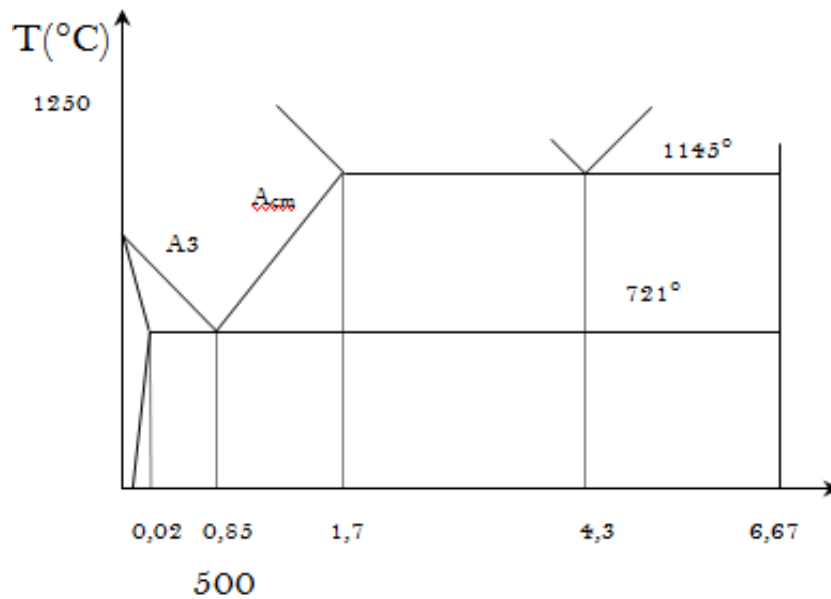
a – Les lignes de transformation du diagramme métastable sont symbolisées par la lettre A affectée d'un indice qui caractérise l'ordre d'apparition de la transformation au chauffage:

- A1: ligne de transformation eutectoïde (721° C).
- A2: Ensembles des points de curie du fer pur et de ses solutions ferritiques.
- A3: Courbe de dissolution de la ferrite dans l'austénite.
- Acm: Ligne de dissolution de la cémentite dans l'austénite.

b – On appelle point de transformation, l'intersection d'une ligne de transformation avec la verticale représentative d'un alliage.

Par exemple, le point d'intersection d'une verticale avec la ligne A3 est aussi appelé A3. Son ordonnée est T (A3).

Remarque: voir lignes de transformations à la figure ci-dessous



Lignes de transformation des aciers.

3.2 Constituants des fontes:

Les fontes sont des alliages fer carbone de teneur en carbone compris entre 1,7% et 6,67%, pouvant se solidifier dans le système métastable (fontes blanche) ou dans le système stable (fontes grise).

Leur appellation provient de l'aspect de leur cassure: **blanc**, s'il y'a précipitation de cémentite, **gris** si le graphite s'est formé en grande quantité.

A température ambiante, les constituants des fontes blanches dépendent de la teneur en carbone:

Nature de la fonte blanche	Hypo eutectique	Eutectique	Hyper eutectique
Constituants	LEDEBURITE + CEMENTITE + PERLITE	LEDEBURITE	LEDEBURITE + CEMENTITE
Phases	FERRITE + CEMENTITE		

Composition de la lédéburite: À la température 1145° C, la lédéburite est constituée de cémentite et d'austénite le pourcentage d'austénite est:

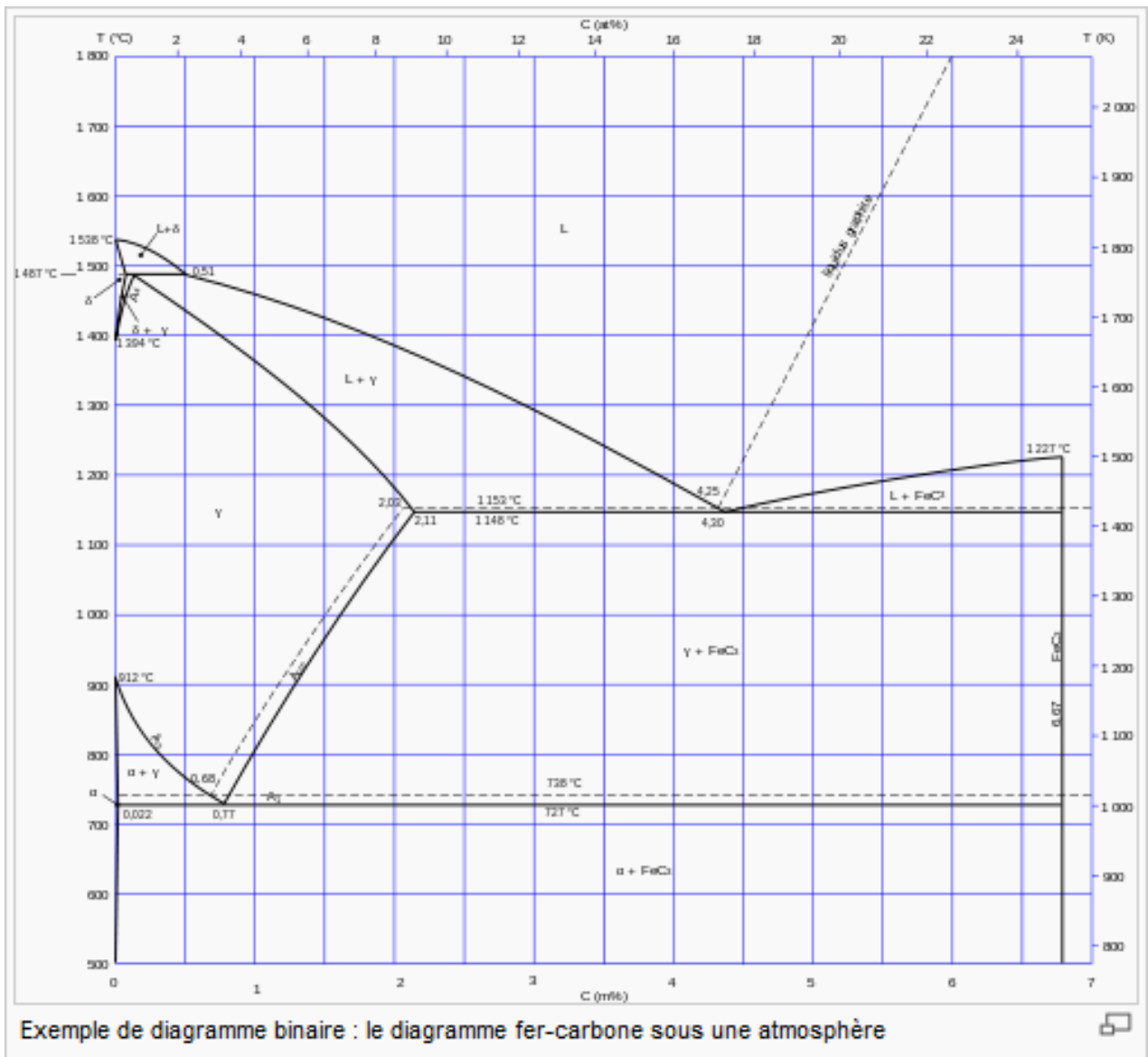
$$\text{Austénite}\% = \frac{EE2}{E1E2} = \frac{(6,67 - 4,3)}{(6,67 - 1,7)} = 0,48 = 48\%.$$

La lédéburite est constituée donc de:

- 48% d'austénite lédéburitique (à 1,7% de carbone)

□ 52% de cémentite.

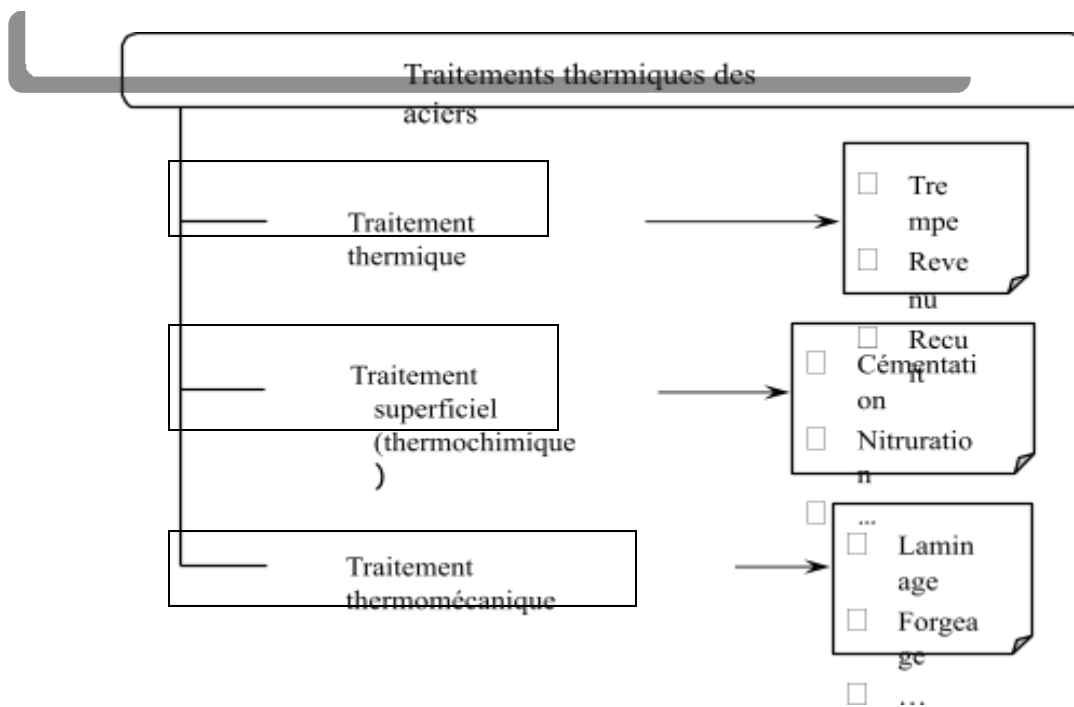
Remarque: la lédéburite est un composant non stable qui ne peut exister qu'entre les températures 721° C et 1145° C. En effet au refroidissement et à la ligne de transformation A1 l'austénite lédéburitique se transforme en ferrite et cémentite.



LES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS

I. Introduction

Pour des exigences des propriétés d'emplois on fait appel à des aciers alliés (Aciers faiblement alliés et aciers fortement alliés), sauf les aciers de classe A et E tous le reste des aciers sont capables de donner des performances mécaniques meilleurs par traitements thermiques, traitements thermochimiques et traitements thermomécaniques.



A quoi consiste à subir une pièce un traitement thermique ?

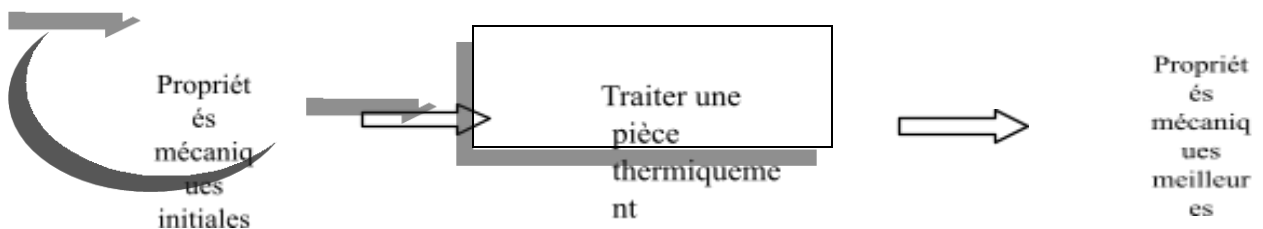
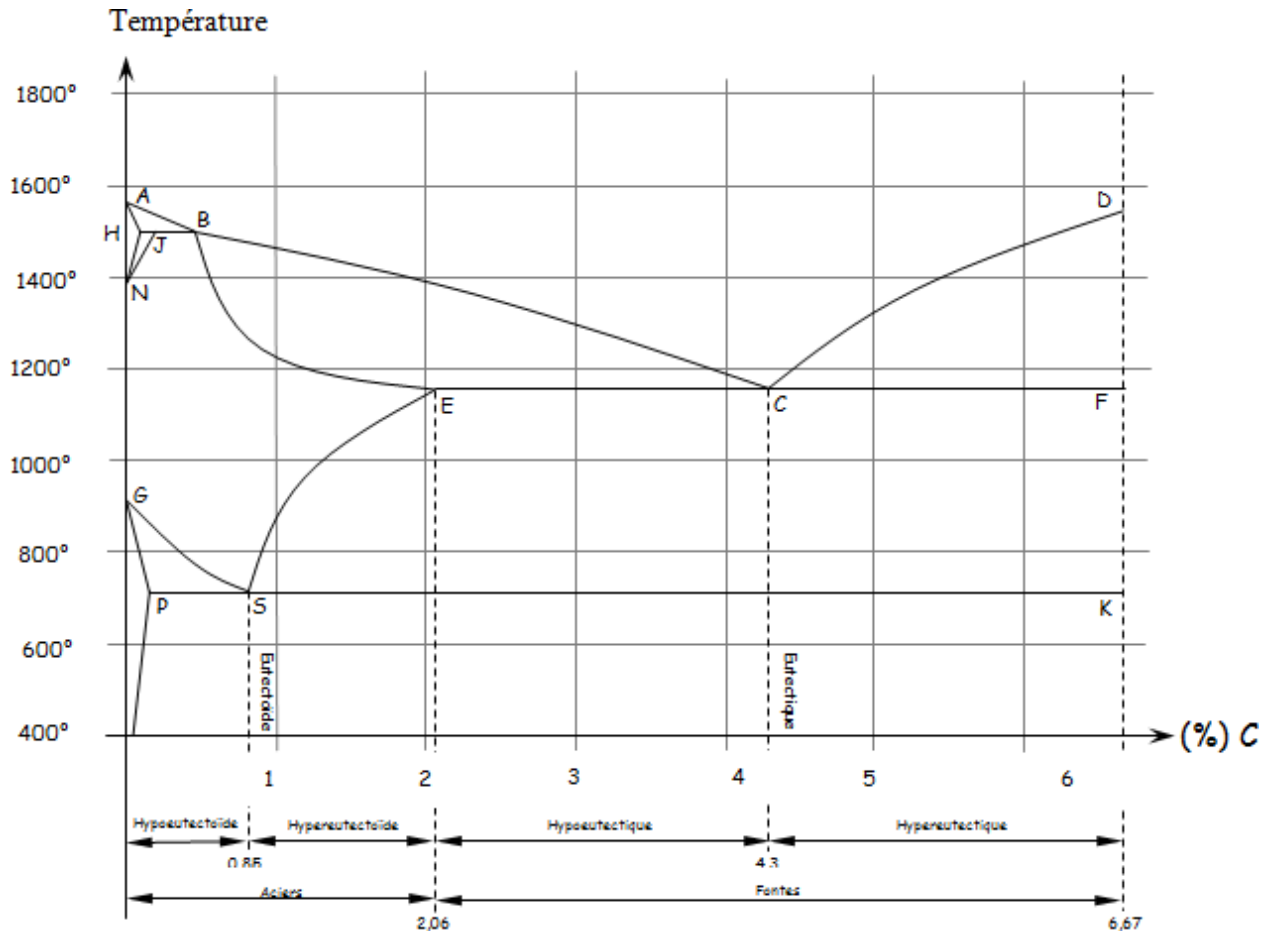
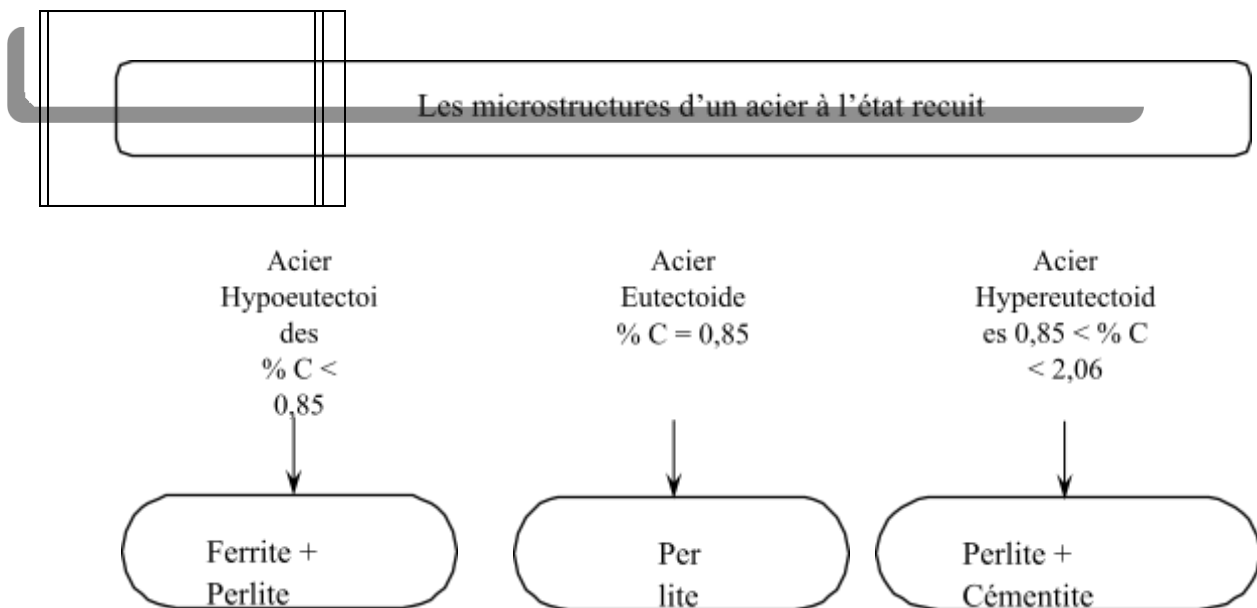
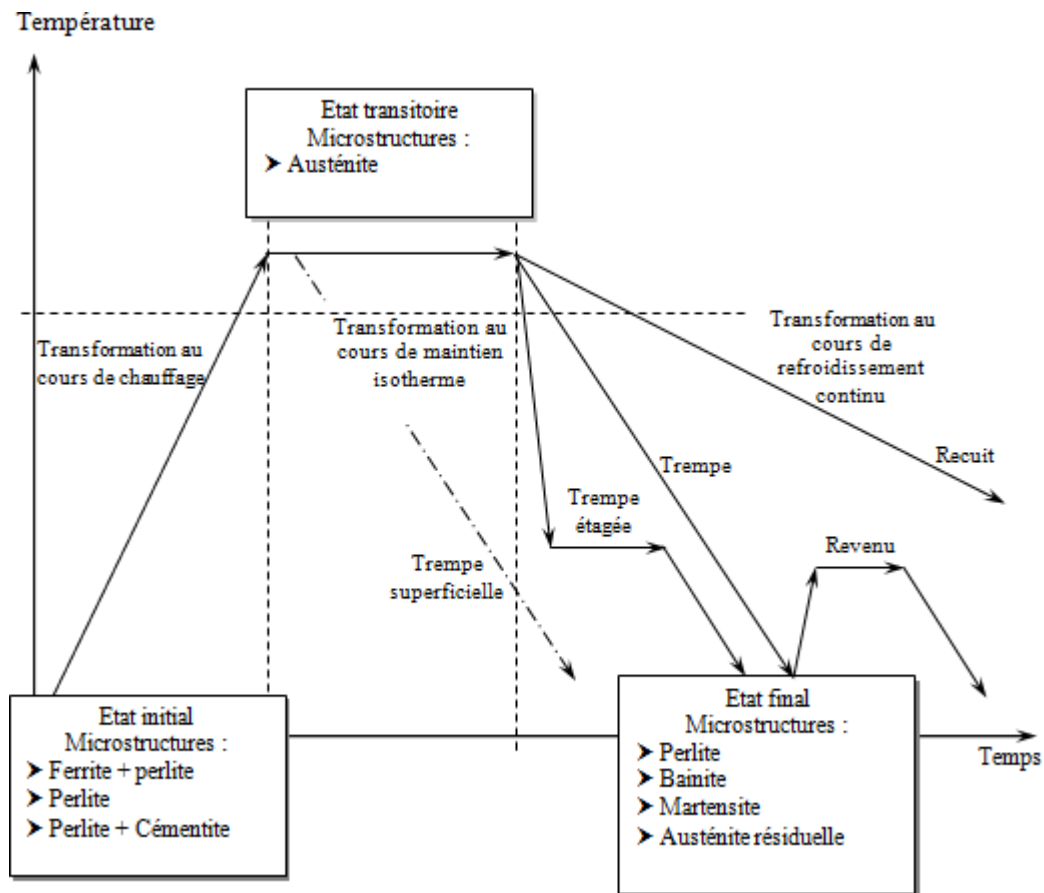


Diagramme fer carbone :



Les microstructures des aciers à la température ambiante sont :





Les conditions de chauffage

Les conditions de chauffage ⁽¹⁾ et de refroidissement ⁽²⁾ déterminent la nature des diverses opérations de traitements thermiques.

(1) - Vitesse de chauffage V_c .

- Température de maintien T_c .
- Temps de maintien t_c .

(2) - Vitesse de refroidissement V_r .

- Température de maintien isotherme T .
- Durée de maintien isotherme t .

Austénitisation des aciers

La possibilité d'austénitiser un acier est une condition absolument nécessaire pour pouvoir traiter thermiquement le métal.

Les conditions d'austénitisation :

- Température d'austénitisation θ_a .

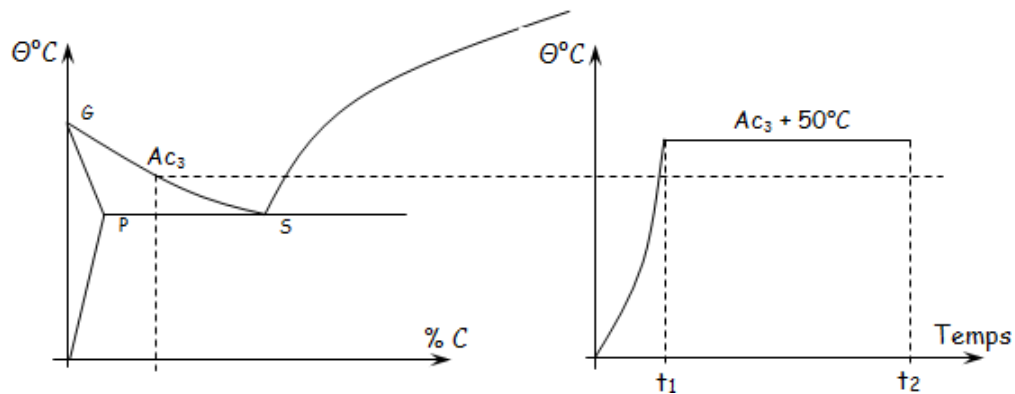
Pour les aciers Hypoeutectoides $\theta_a = A_{c3} + 30$ à 50°C , dans la plupart des cas. Et pour les aciers Hypereutectoides ce sont des cas typique d'austénitisation partielle, $\theta_a = A_{c1} + 50^\circ\text{C}$.

- Durée d'austénitisation t_a .

Le temps de maintien est fonction de la massivité de la pièce. Ce temps compte à partir du moment où le cœur de la pièce est à la température de trempe, il doit être suffisant pour permettre la mise en solution de l'austénite et de sa homogénéisation. On compte généralement de 2 à 3 mn par mm d'épaisseur à partir de la température ambiante.

- *Grosseur du grain austénitique G_a .*

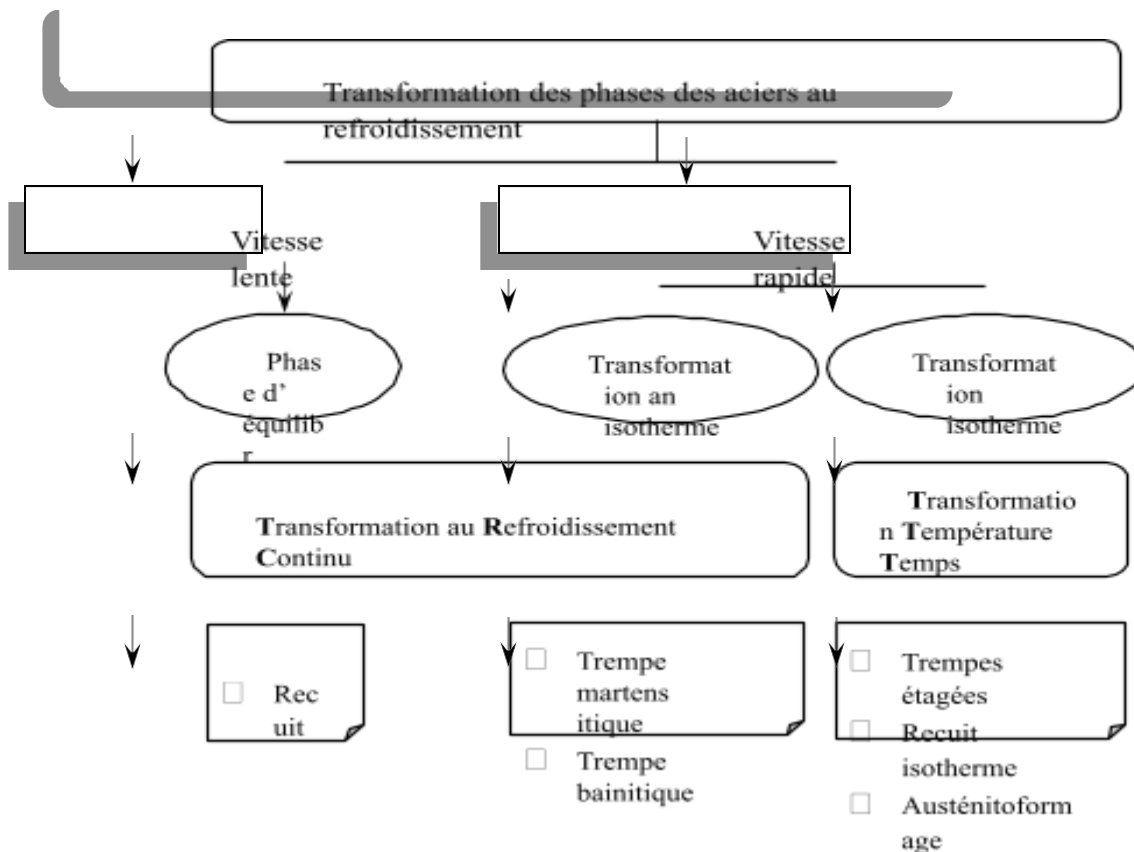
Ces paramètres ont des influences importantes sur les comportements des aciers au cours du traitement ainsi qu'après celui-ci.



Remarque :

La montée en température doit être lente pour éviter les déformations et les tapures. Un ou plusieurs préchauffages sont recommandés sur les pièces massives ou devant être traitées à haute température (cas des aciers rapides).

II. transformations des phases des aciers au refroidissement.



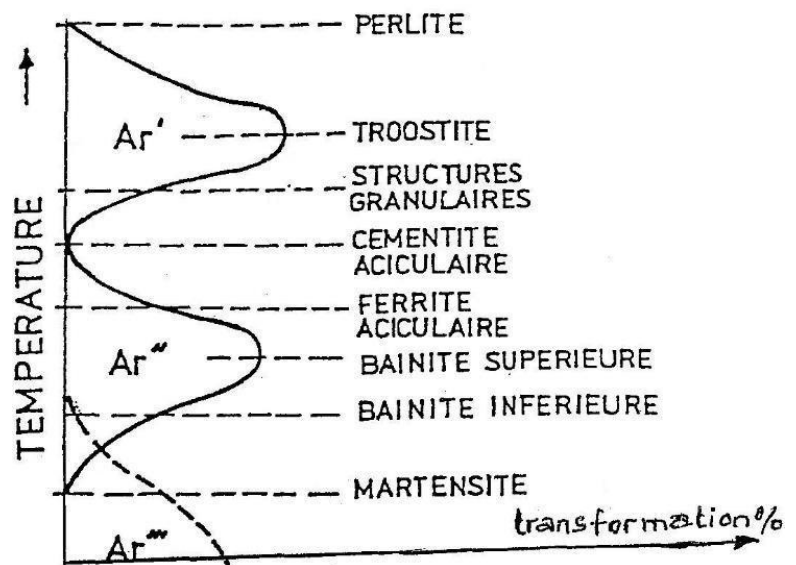
II. 1. Transformation au cours de maintien isotherme

La transformation de l'austénite s'effectue par le refroidissement qui suit le maintien à une température inférieur à A_{r1} dans un bain du sel ou de plomb.

Cette transformation isotherme, de l'austénite concerne les diagrammes T.T.T (Transformation en fonction de la Température et du Temps.).

On distingue trois domaines de températures : Ar' , Ar'' , et Ar''' (Fig.1) concernant les transformations isothermes ainsi que an isothermes.

Fig.1 :
Domaine des
températures
 Ar' , Ar'' et Ar'''



Transformation perlitique Ar' :

La décomposition de l'austénite s'effectue après un certain temps dit période d'incubation noté $\tau_{0,0}$ (Fig. 2).

On distingue les deux cas suivants :

□ Cas d'un acier hypoeutectoïde :

Les premiers grains sont la ferrite α étant la phase directrice, puis il y'aura formation de la perlite lamellaire ($\alpha + Fe_3C$).

□ Cas d'un acier hypereutectoïde :

Les premiers dépôts de la cémentite Fe_3C étant la phase directrice puis il y'aura formation de la perlite. La perlite fine est formée si la température de transformation est plus basse. La perlite lamellaire très fine est appelée **troustitite**. Si la température de transformation est très proche de A_{r1} , On obtient la perlite globulaire.

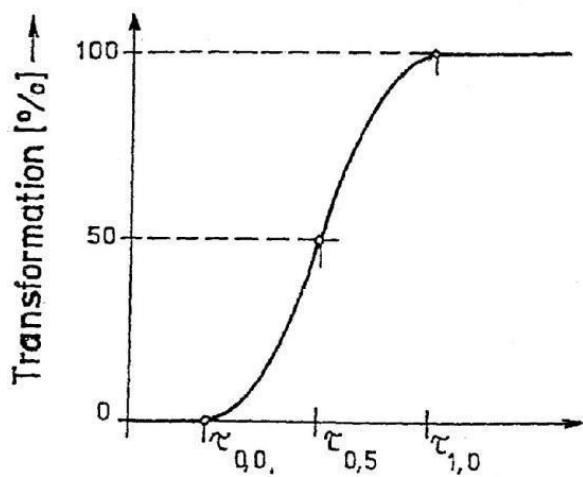


Fig2 :

Temps d'incubation de la transformation Ar'

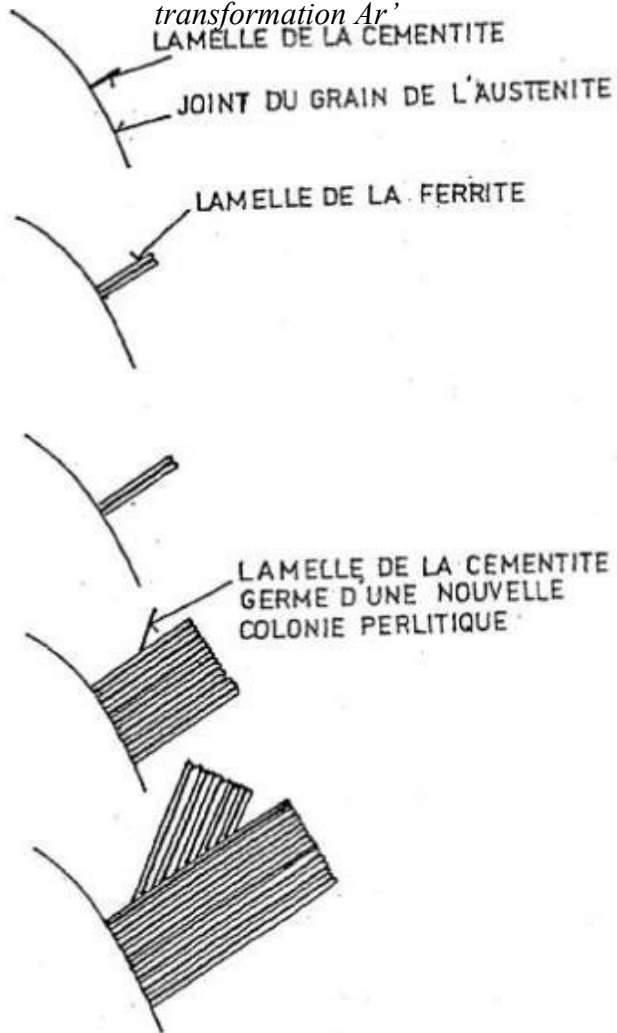


Schéma du mécanisme de la formation de la colonne perlitique.

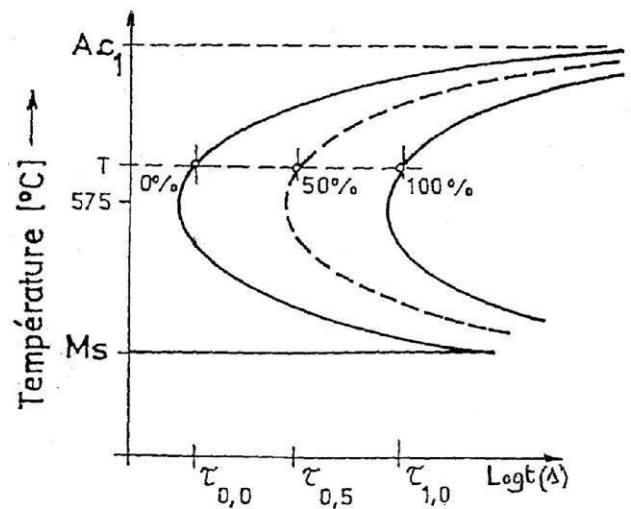


Fig3 :

Décomposition isotherme de l'austénite dans le domaine perlitique.

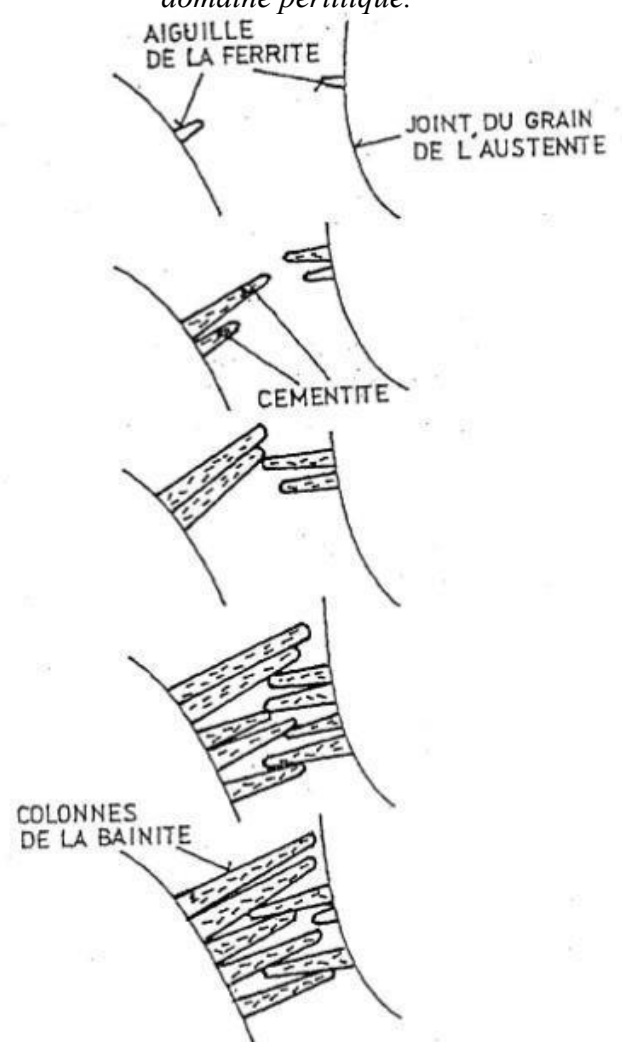


Schéma du mécanisme de la formation de la colonne bainitique.

Transformation Ar'' :

Au dessous de $600 - 550^{\circ}\text{C}$ il y'a lieu de la décomposition de l'austénite à **la bainite**. Cette transformation s'effectue par le phénomène appelé la germination et croissance. Les caractéristiques de la bainite sont :

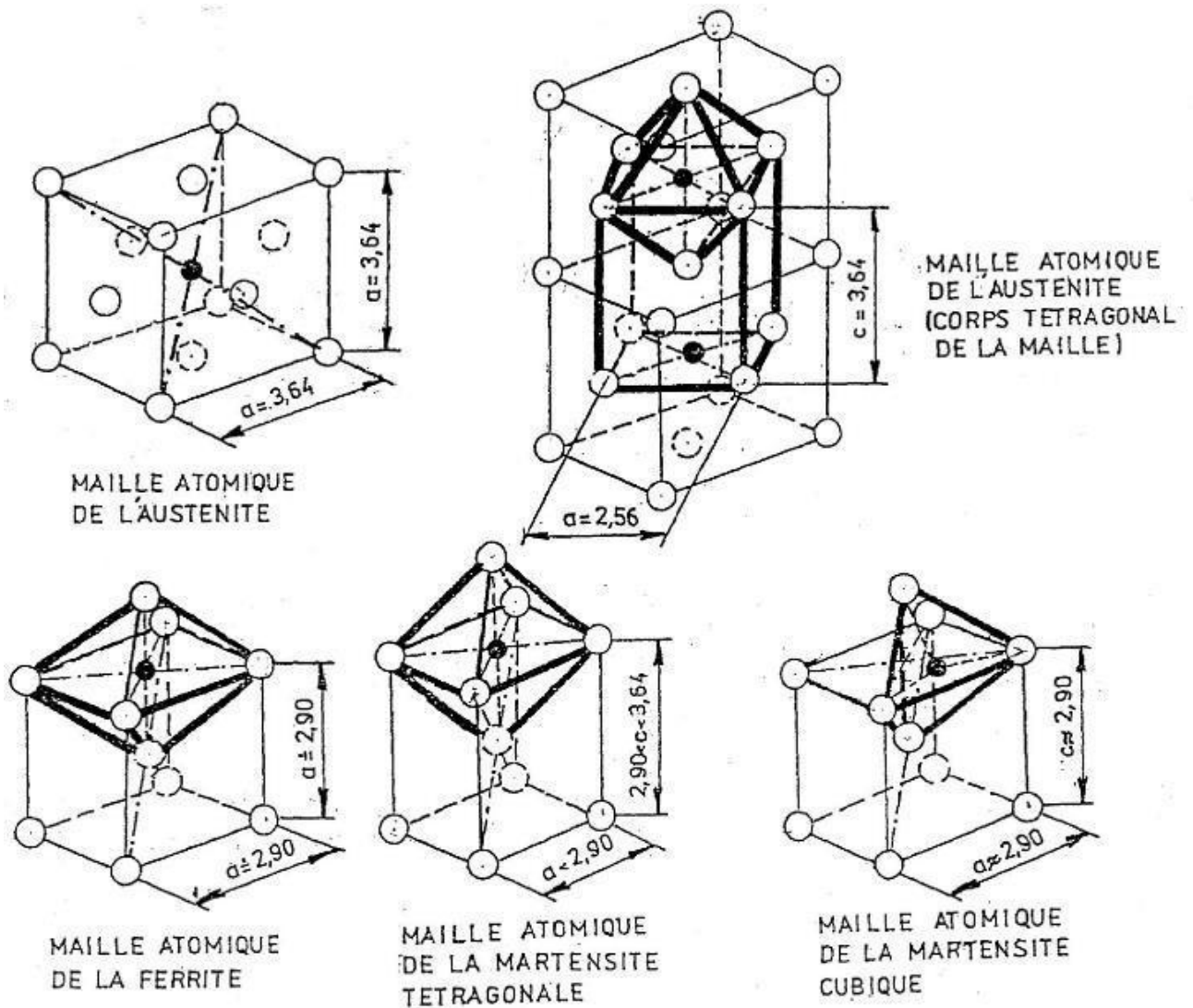
Structure ferrito – cémentitique.

L'élément directeur de la transformation est la ferrite.

Suivant la température de la transformation on distingue La bainite supérieure, la bainite moyenne et la bainite inférieure.

Transformation martensitique Ar''' :

La martensite est définie comme une solution solide d'insertion sursaturée de carbone dans le fer α . Ainsi les atomes de carbone sont dans la maille atomique emprisonnés, la maille tétraгонаlement déformée.



Comparaison de la maille atomique de l'austénite, de la ferrite et de la martensite.

Caractéristiques de la transformation martensitique :

- C'est une transformation de l'austénite qui se fait à une vitesse extrêmement grande.
- C'est une transformation sans diffusion.
- Elle s'effectue dans les limites des températures **Ms** (*Martensite Start*) et **Mf** (*Martensite Finish*).
- Elle a une structure quadratique dont les paramètres de la maille sont fonction de la teneur en carbone.
- Elle est accompagnée par un changement du volume spécifique ce qui engendre des déformations et des contraintes internes dans la pièce qui subit cette transformation.
- Elle est uniquement fonction de la température et ne dépend pas du temps.
- Les températures Ms et Mf dépendent de la teneur en carbone, des éléments d'alliage et de la grosseur moyenne de l'austénite.
- L'influence des éléments d'alliages sur la dureté de la martensite (Fig.4) est négligeable

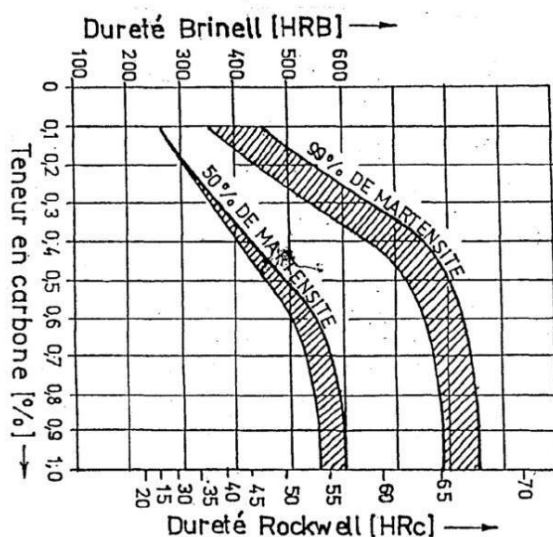
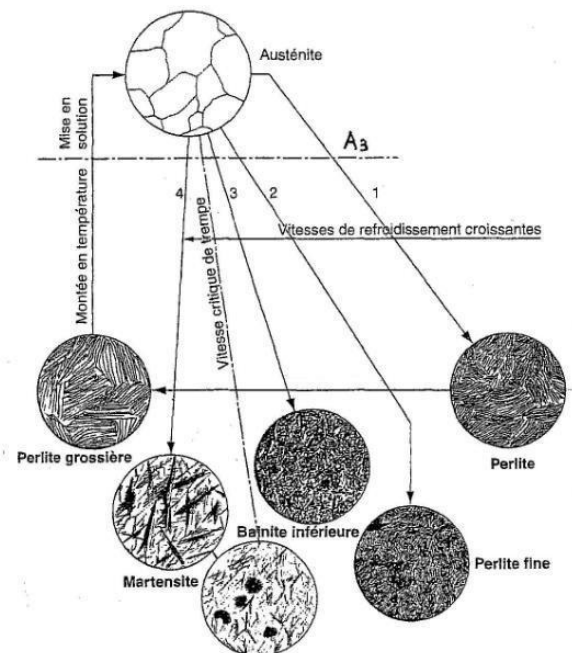


Fig.4 :

Influence de la teneur en carbone sur la dureté de la martensite.



Microstructures types en fonction des vitesses de refroidissement

L'austénite résiduelle :

La transformation martensitique est complète à condition de refroidissement au – dessous de M_f , pour la plupart des aciers cette température est au – dessous de la température ambiante.

De ce fait, une partie de l'austénite reste non transformée c'est l'austénite résiduelle étant une structure douce.

La Proportion de l'austénite résiduelle est fonction de la composition chimique d'un acier et par suite, de m_s et M_f .

La décomposition supplémentaire de l'austénite résiduelle par chauffage est accompagnée par une augmentation du volume spécifique ce qui engendre de nouvelles contraintes internes dans la masse d'acier ce qui se manifeste entre autre par abaissement de la ténacité et par augmentation de la dureté étant appelé " Durcissement secondaire".

Seulement les aciers à basse teneur en carbone ne sont pas sensibles à une présence de l'austénite résiduelle du fait de sa quantité nulle ou très faible.

II. 2. Différents types de courbes en S :

Ces courbes représentent les diagrammes T.T.T.

- Elles indiquent le début et la fin de la transformation.
- On les appelle les courbes iso austénitiques.
- La forme de ces courbes donne une indication à l'aptitude à la transformation et son déroulement.
- On les trouve dans la documentation (Catalogues) pour les différentes nuances d'aciers.

La forme d'une courbe iso austénitique peut varier suivant les éléments d'alliage. On distingue deux types de variation :

- Des éléments d'alliage qui repoussent la courbe vers la droite (Ni est le plus actif).
- Des éléments d'alliage qui repoussent la courbe vers la droite et qui font apparaître deux domaines distincts (Cr, Mo, V...sont les plus actifs).

Les actions des éléments d'alliage se superposent si l'acier contient simultanément un élément de ces deux types d'éléments d'alliage qui en général retardent le début de la transformation austénitique.

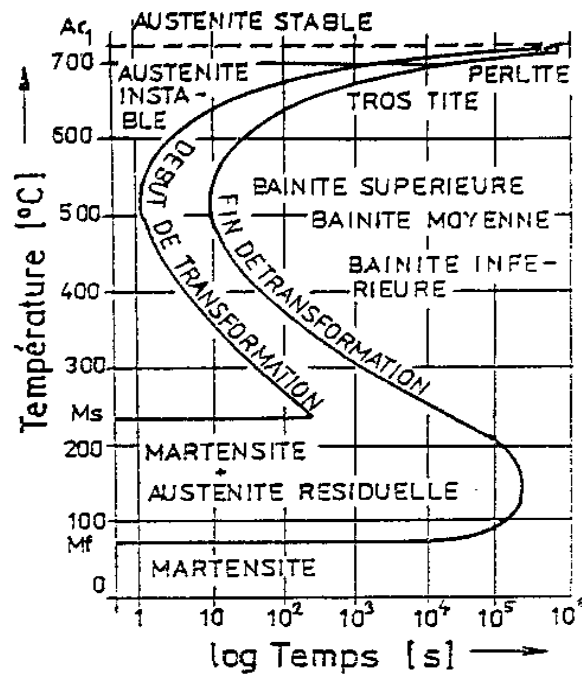


Diagramme T.T.T. de l'acier au carbone eutectoïde.

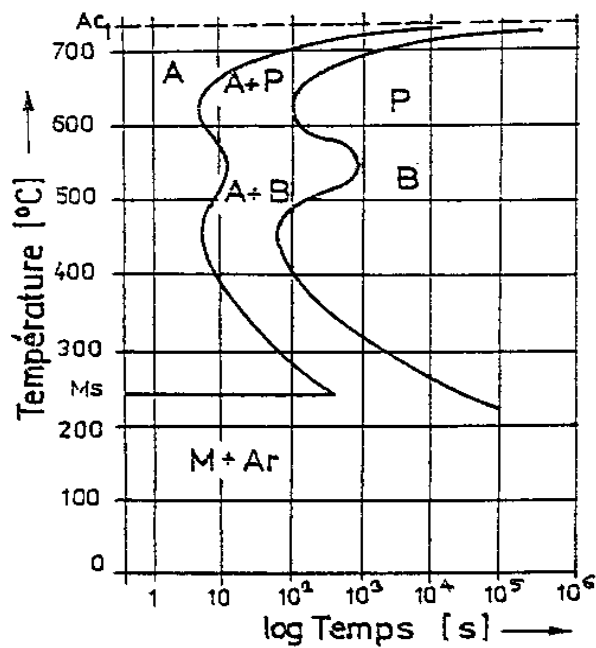


Diagramme T.T.T. de l'acier carbone eutectique.

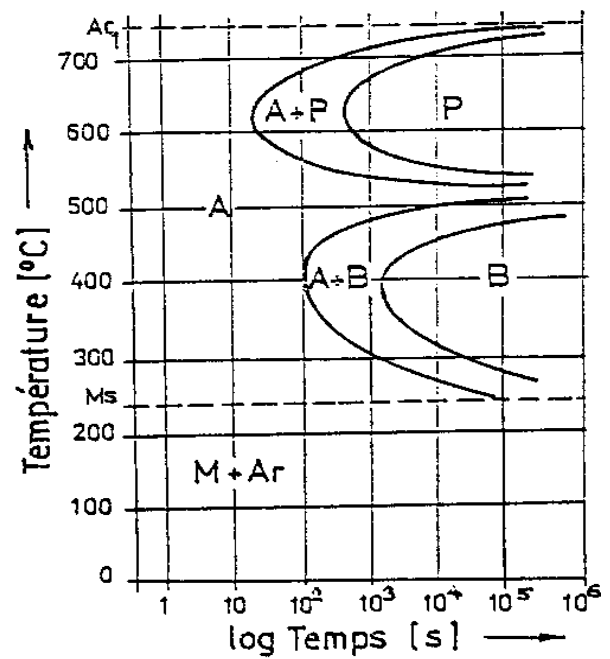


Diagramme T.T.T. de l'acier allié.

Influence des éléments d'alliage sur la forme de la courbe iso austénitique.

II. 3. Transformations au Refroidissement Continu (TRC)

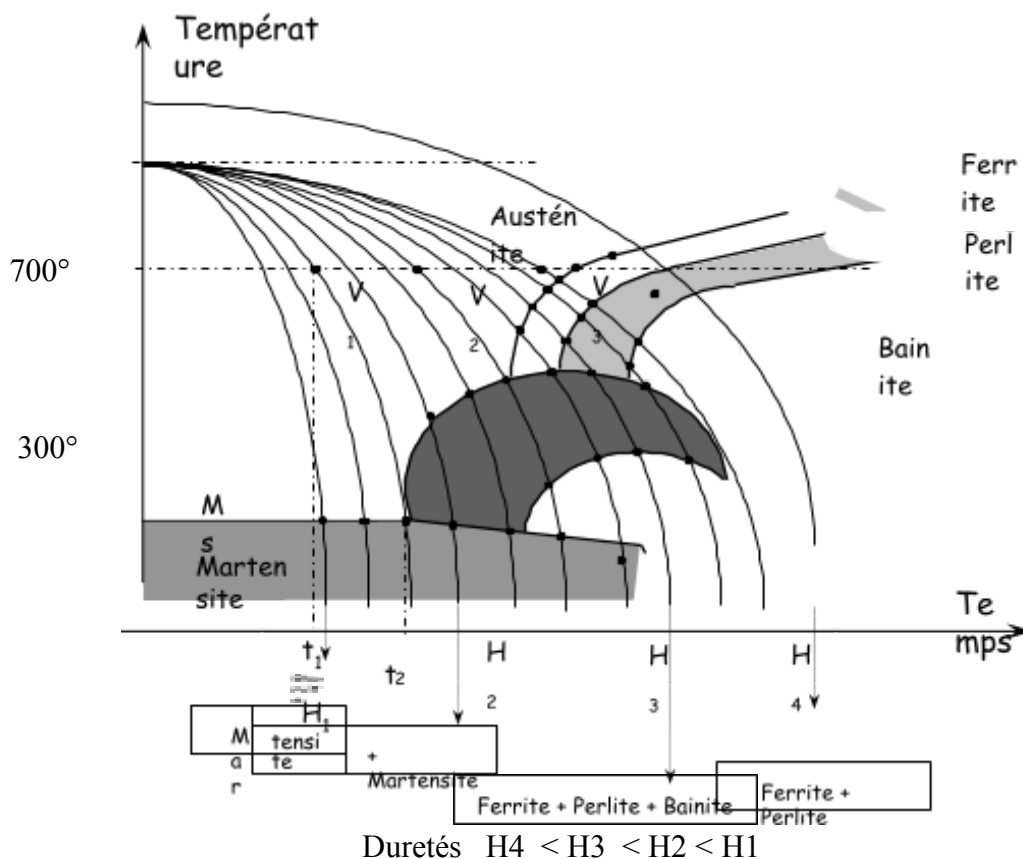
Des échantillons de faibles dimensions. Après austénitisation sont soumis à des lois de refroidissement différentes selon l'échantillon, allant de quelques degrés par heurs à plusieurs centaines de degrés par seconde. Selon le fluide de trempe utilisé lors d'un refroidissement continu ou an isotherme, on peut ainsi simuler approximativement les lois de refroidissement.

II. 3.1. Méthode de traçage des diagrammes (TRC) :

Pour chaque loi de refroidissement, on repère les températures auxquelles se sont amorcées les transformations, ainsi que le temps. Après refroidissement, on identifie les constituants obtenus et on contrôle leur dureté ROCKWELL et VICKERS pour les plus faibles.

Il est ainsi possible en joignant les différents points repérés de délimiter les zones de formation d'un même constituant et de tracer leur enveloppe.

Dans le diagramme ainsi obtenu la température est portée en ordonnée et le temps en abscisse, du fait que l'on désire utiliser le diagramme pour des refroidissements très lents ou très rapides. On trace une échelle logarithmique des temps.



L'acier est caractérisé par trois vitesses critiques de base.

- V1 : vitesse critique de trempe martensitique.
- V2 : vitesse critique de trempe bainitique.
- V3 : vitesse critique de recuit.
- Avec $V1 = (700 - 300) / (t2 - t1) \text{ } ^\circ\text{C/s}$

II. 3.2. Utilisation des diagrammes TRC :

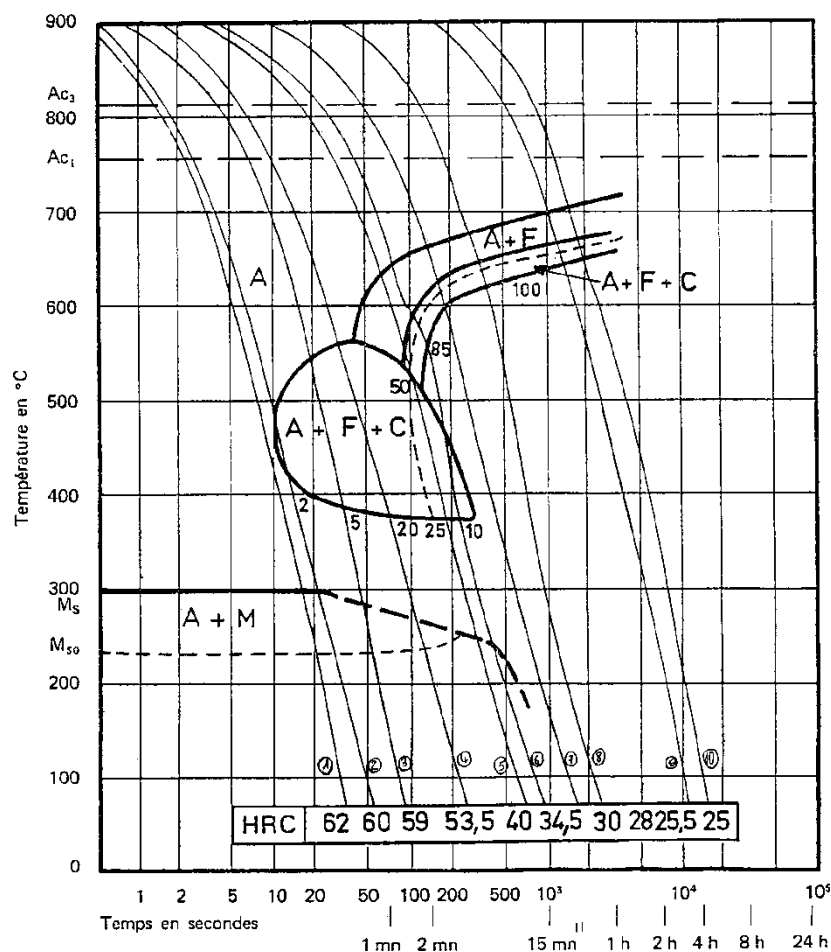
Soit le diagramme TRC de l'acier 45 Mn Si 6 donner ci-dessous.

45 Mn Si 6

C%	Mn%	Si%	S%	P%	Ni%	Cr%	Mo%	Cu%	V%
0,45	1,5	1,34	<0,01	0,017	0,03	0,03	<0,01	0,09	0,04

Austénitisé à 925°C 30mn

Grosueur du grain : 8-10



Les transformations an isothermes de l'austénite conduisent aux même types de réaction qu'on conditions isothermes. On retrouve sur les diagrammes TRC : les domaines ferritique, perlitique, bainitique et martensitique, précédés par le domaine de l'austénite hors d'équilibre en dessous de Ac1.

L'évolution de l'austénite se lit le long des lois de refroidissement reportées sur le diagramme.

Les nombres indiqués le long d'une courbe particulière correspondent aux pourcentages massiques du constituant formé dans le domaine qu'on vient de quitter.

Loi 1 : après un temps d'incubation de 17s la transformation de l'austénite débute à 300°C par formation de la martensite qui s'achève à la température ambiante. La microstructure finale est 100% martensitique ; C'est la trempe martensitique. On néglige pour cette nuance la présence éventuelle de l'austénite résiduelle.

Après ce traitement la dureté est 62 HRc.

Loi 4 : après un temps d'incubation de 35s la transformation de l'austénite débute à 560°C par formation de la bainite qui s'achève à 375°C après formation de 20% de bainite. Après un nouveau domaine de stabilité (375-270°C) l'austénite non transformée va donner entre 270°C et l'ambiante 80% de martensite. On néglige pour cette nuance la présence éventuelle de l'austénite résiduelle.

Après refroidissement. L'acier est constitué de bainite et de martensite ; c'est la trempe bainitique.

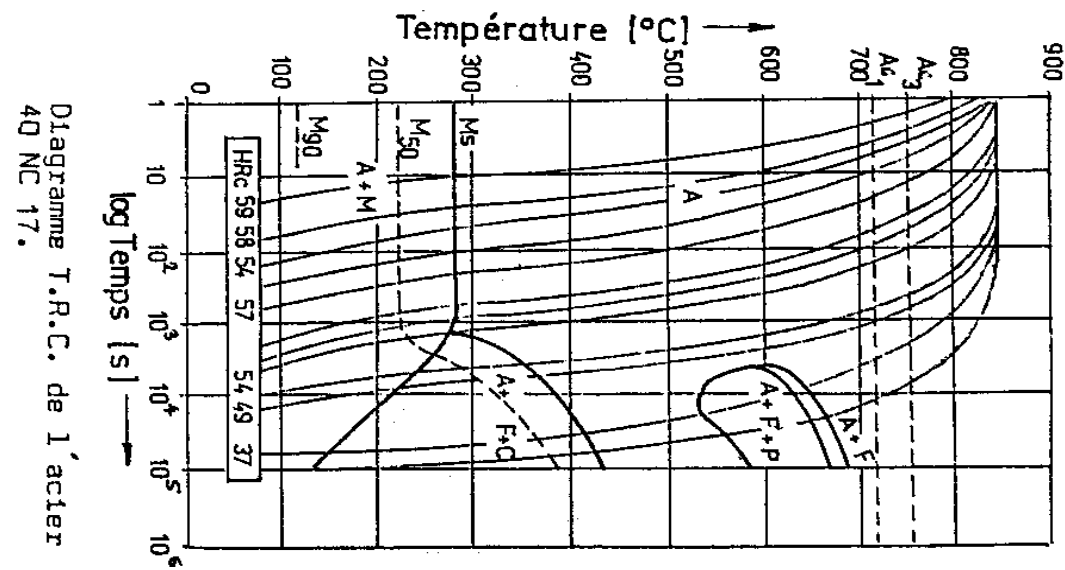
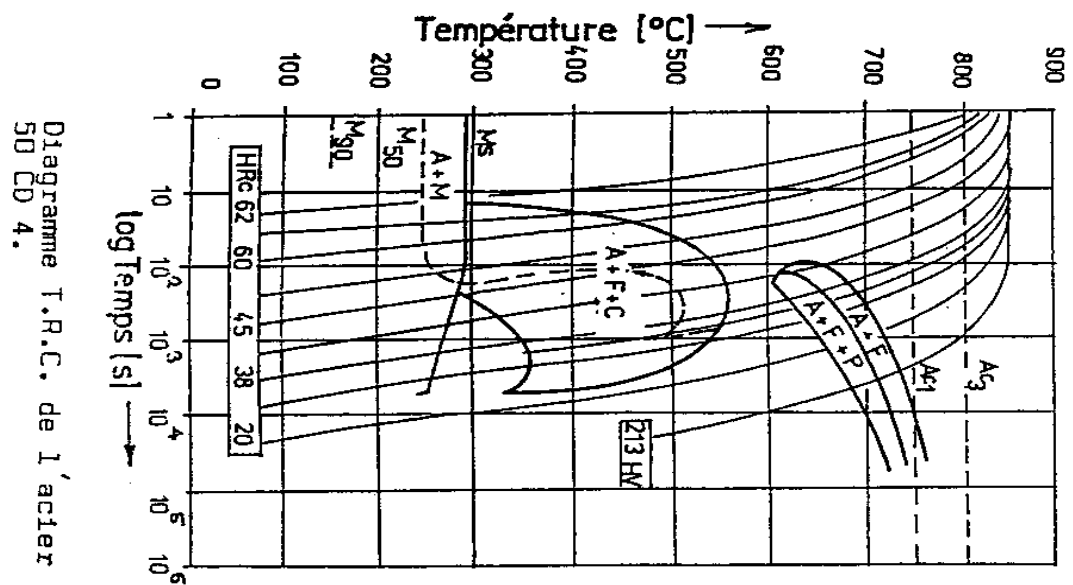
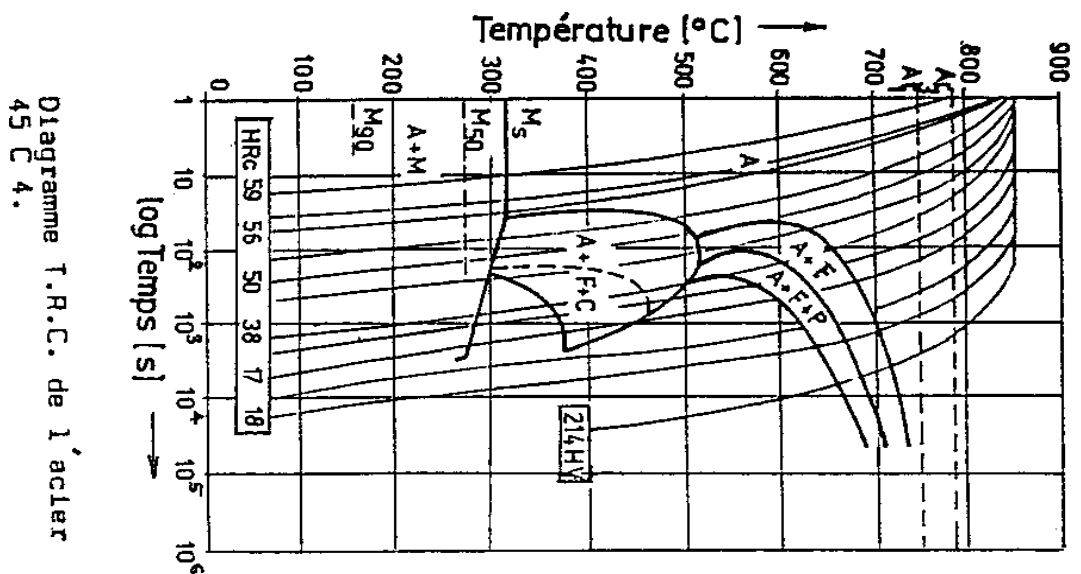
Après ce traitement la dureté est 53,5 HRc.

Loi 10 : après un temps d'incubation de 22min la transformation de l'austénite débute à 705°C par formation de la Ferrite. A 31min et à une température de 670°C débute la transformation en perlite qui s'achève à 650°C.

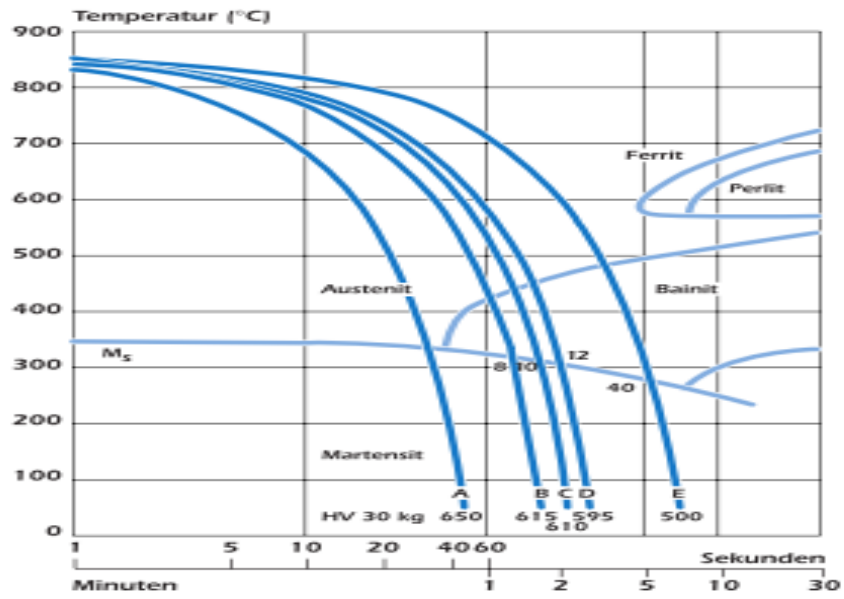
Après refroidissement. L'acier est constitué de Ferrite et perlite.

Après ce traitement la dureté est 25 HRc.

II. 3.3. Différents types de courbes TRC:



**DIN 42 CrMo 4 – Austenitisiert bei 850°C,
Haltezeit 10 Minuten**



III. La trempe des aciers

Le traitement de trempe comprend :

- Un chauffage lent à une température dépendant du type d'acier à traiter.
- Un temps de maintien à la température pour que les transformations soient complètes.
- Un refroidissement effectué à partir de la température dite température de trempe jusqu'à une température plus basse pouvant différer de la température ambiante.

Le traitement de trempe fait en général augmenter R_m , R_e , et H et diminuer $A\%$, $Z\%$ et K (résilience).

Il est suivi d'un second Traitement appelé revenu qui a pour but de réduire les effets de la trempe.

Il améliore la résilience, diminue la dureté et supprime les tensions internes issues de la trempe.

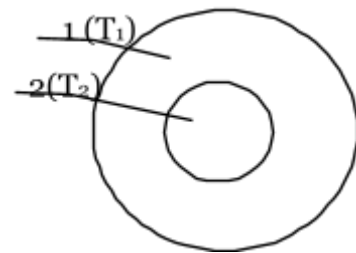
Les dés faux engendrés par la trempe :

- Décarburation superficielle due à l'atmosphère (généralement oxydation des fours).
- Corrosion en cas de maintien prolongé à haute température.
- Contraintes interne σ_i qui résultent des vitesses de refroidissement différentes (ou de chauffage)

entre les diverses parties de la pièce et de la transformation martensitique dans le cas de la trempe des aciers.

Vitesses de refroidissement différentes :

$(T_1) < (T_2)$. La partie (1) tend se contracter alors que la partie (2) ne veut pas donc ce phénomène engendre une compression sur (2) et une tension sur (1).



Transformation martensitique :

La transformation martensitique est toujours accompagnée d'une dilatation de la pièce, le cœur se transforme en martensite donc il se dilate alors que la couronne (1) est plus froide donc moins plastique par suite elle va subir une tension par dilatation du cœur.

Si σ_i dépasse la limite élastique, la pièce va se déformer.

Si σ_i dépasse la résistance à la rupture, alors il y'aura formation des fissures à la surface de la pièce appelées Tapures.

Trempabilité des aciers :

La trempabilité se propose d'évaluer l'aptitude d'un acier à subir la trempe. L'essai JOMINY définit les conditions de réalisation de cette évaluation. Cette technique consiste à :

- Austénitiser dans les conditions convenables une "éprouvette JOMINY" normalisée
- Tremper la base inférieure de cette éprouvette, tenue à l'aide d'un support approprié par un jet d'eau courante de température comprise entre 15 et 25 °C jusqu'à son refroidissement total par

conduction (*Fig.5*).

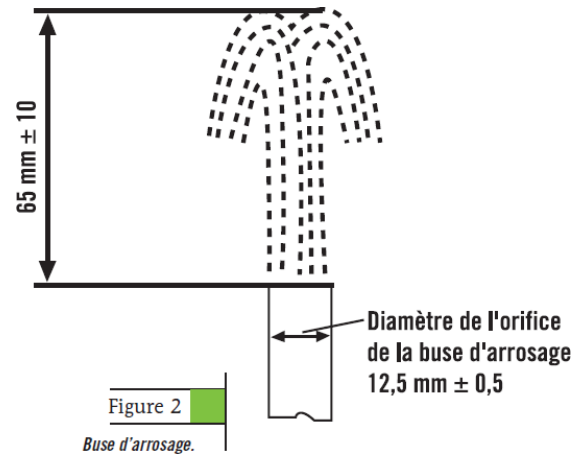
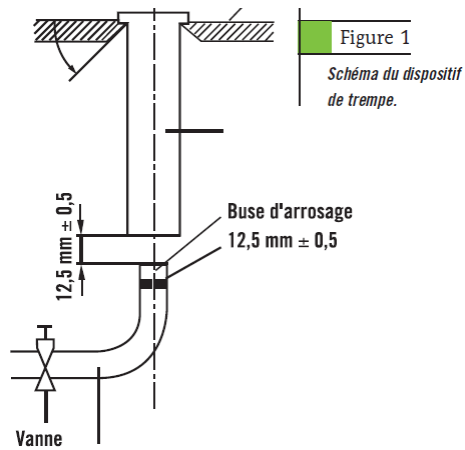


Fig.5

Schéma du dispositif de l'essai Jominy.

- Mesurer la variation de la dureté sur un méplat de la génératrice de l'éprouvette à partir de son extrémité trempé selon les distances : 1,5, 3, 5, 7, 9, 10, 13, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 70... Ces distances seront désignées par J1.5, J3, J5, J7, J9...

La courbe de la dureté H (HRC, HV) en fonction de la distance d (mm) entre la base refroidie et le point de relèvement de la mesure de dureté qui portera le nom de courbe Jominy permet de déterminer la trempabilité de l'acier (Fi.6).

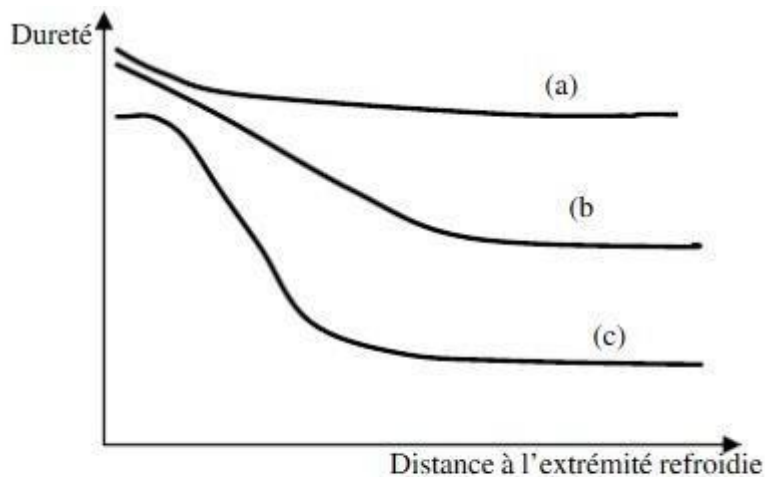


Fig 3 : Courbe Jominy d'aciers.

(a) : acier à bonne trempabilité, (b) : acier à moyenne trempabilité,

(c) : acier à mauvaise trempabilité.

Fig.6 :

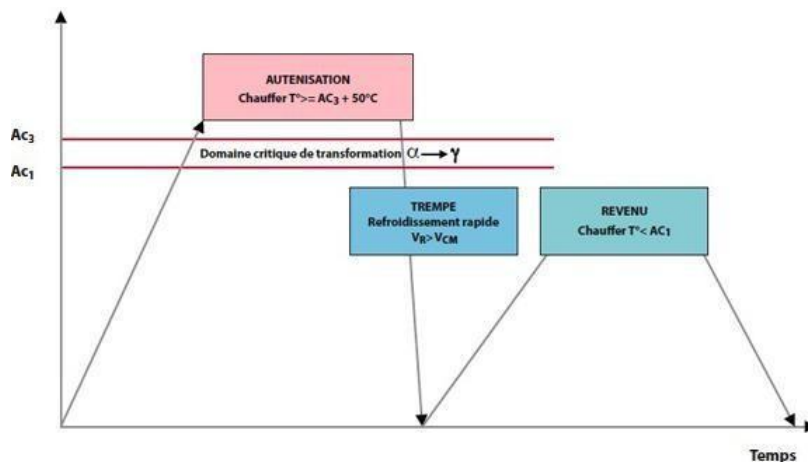
Courbe Jominy d'aciers.

IV. Le revenu des aciers :

D'une manière générale, le revenu permet de diminuer les effets néfastes de la trempe : fragilité de la pièce et les contraintes internes.

Le revenu est donc un traitement thermique effectué après trempe, il consiste en (Fig. 7):

- Un réchauffage à une température $T_R < A_{c1}$.
- Un maintien de durée t_R à T_R .
- Un refroidissement long jusqu'à la température ambiante.



Gig.7 :

Cycle
complet
Trempe,
Revenu

Différents types de revenu :

En fonction du résultat attendue, on distingue plusieurs types de revenu :

Revenu de relaxation ou de détente :

Il s'effectue entre $180^\circ C$ et $220^\circ - 250^\circ C$. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes dues à la trempe. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle.

Revenu de structure ou classique :

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 450° et A_{c1} . On observe une augmentation des caractéristiques K , $A\%$ et Z et une diminution plus importante de H , R_m , et R_e . Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.

Revenu de durcissement :

Des revenus effectués entre 450° et $600^\circ C$ sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y'a

d'abord précipitation des carbures complexes maintenus en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second

revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas une fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires).

V. Recuit des aciers

Le recuit est un traitement thermique adapté à l'élimination ou à la réduction des effets néfastes de la ségrégation, l'écrouissage et les contraintes de soudage etc.

D'une manière générale, le recuit a comme conséquence le retour à un équilibre physico-chimique et/ou mécanique plus ou moins complet, lié éventuellement à une tendance vers l'équilibre structural.

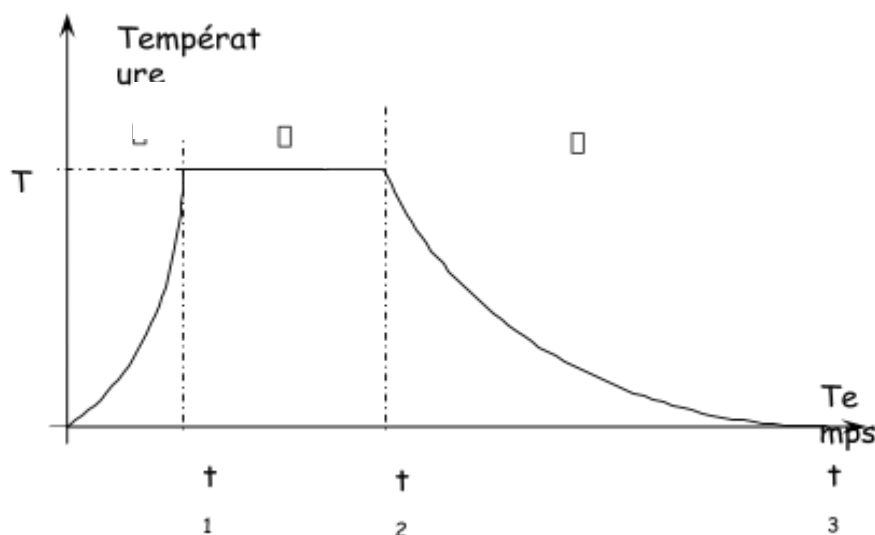
- Equilibre physique : équilibre des phases.
- Equilibre chimique : composition chimique.
- Equilibre mécanique : contraintes internes.
- Equilibre structural : taille des grains, défaut de structure.

Le recuit conduit aux caractéristiques de ductilité les plus grandes (A%, K) et aux caractéristiques de dureté les plus faibles (H, E, R).

Cycle thermique de recuit

Le cycle thermique de recuit comprend :

- ‡ Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de correction à réaliser.
- ‡ Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- ‡ Un refroidissement à l'air calme ou selon une loi programmée, La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit V_3 .



Différents types de recuit

Recuit d'homogénéisation :

- Diminue les hétérogénéités chimiques.
- Se fait au dessus d'A3.
- Refroidissement inférieur à la vitesse critique de trempe (pour éviter la transformation martensitique).

Recuit de régénération :

- Diminue la taille des grains due à une surchauffe au cours d'une soudure ou d'un forgeage (à chaud).
- Se fait au dessus d'A3.
- Refroidissement inférieur à la vitesse critique de trempe.

Recuit d'adoucissement :

- Destiné à faciliter l'usinage des pièces.
- Se fait au dessus d'A3.
- Refroidissement inférieur à la vitesse critique de trempe.

Recuit de détente :

- Réalise l'équilibre mécanique.
- Se pratique en dessous d'A1.
- Refroidissement lent pour ne pas introduire des contraintes internes.

Recuit de recristallisation :

- Régénère une structure nouvelle à partir d'une structure écrouie.
- Se fait en dessous d'A1.
- Refroidissement lent.

DESIGNATION DES METAUX

I. Symboles chimiques et AFNOR des métaux purs:

Elément	Symbole Chimique	Symbole AFNOR	Elément	Symbole chimique	Symbole AFNOR
Aluminium	Al	A	Molybdène	Mo	D
Antimoine	S	R	Nickel	Ni	N
Azote	b	A	Niobium	Nb	Nb
Béryllium	N	z	Phosphore	P	P
Bismuth	B	Be	Plomb	Pb	Pb
Bore	e	Bi	Sélénium	Se	Se
Cadmium	Bi	B	Silicium	Si	S
Chrome	B	Cd	Soufre	S	F
Cobalt	Cd	C	Tantale	Ta	Ta
Cuivre	Cr	K	Titane	Ti	T
Etain	Co	U	Tungstène	W	W
Fer	Cu	E	Vanadium	V	V
Magnésium	Sn	Fe	Zinc	Zn	Z
Manganèse	Fe	G	Zirconium	Zr	Zr
	Mg	M			
	Mn				

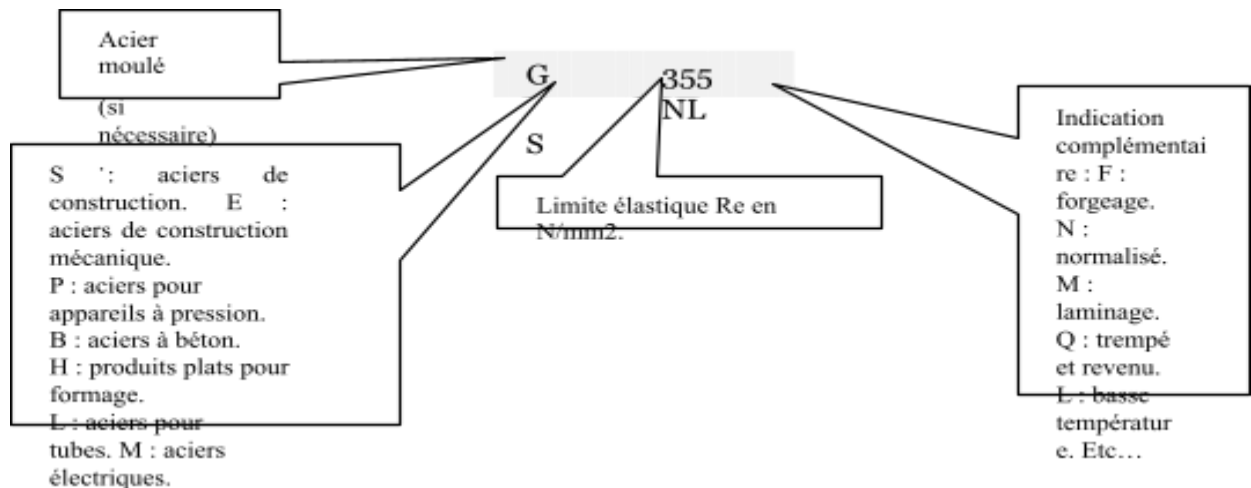
II. Aciers non alliés (Aciers au carbone) :

1. Aciers non alliés d'usage général (S, E, etc.) :

Caractérisés par une faible teneur en carbone, ce sont les plus utilisés. Ils existent dans des qualités diverses (JR, JO, J2, K2...) et des variantes réservées à des usages particuliers (moulage, soudage...). La plupart sont disponibles sous forme de laminés marchands (Profilés, poutrelles, barres, tôles...) aux dimensions normalisées. Certains sont proposés en semi – fini : pré laqués, galvanisés, nervurés, ondulés etc...

Applications : (Construction soudée, formage à froid ou à chaud, emboutissage, étirage, laminage, pliage...) : carrosseries, fers, et profilés pour le bâtiment, construction navale, plate-forme pétrolière, trains chaudronnerie, ameublement, électroménager.

Désignation: la désignation comprend une lettre (S, E, etc.) suivie de la limite élastique à la traction R_e en MPa ou N/mm^2 . S'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre



G.

Exemple : GE 335, GS 235.

Remarques : les valeurs de R_r , R_e , $A\%$ et K_v indiquées varient d'une qualité à l'autre, dépendent des procédés de fabrication, des traitements, des épaisseurs d'un produit à l'autre.

2. Aciers spéciaux, non alliés, de type C :

Applications : Destinés aux traitements thermiques (trempe, cémentation) des pièces petites ou moyennes, ils sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition chimique, une plus grande pureté et des éléments d'addition en très faible quantité ($Mn < 1\%$; $Cr+Ni+Mo < 0,63\%$).

Désignation: La désignation comprend la lettre C suivi du pourcentage de carbone multiplié par 100 plus au besoin des indications complémentaires (E : teneur en soufre, C : formage à froid, S : ressort, D : tréfilage...)

Exemple : GC35 E : 0,35 % de carbone, G = acier moulé, E = teneur maxi en soufre.

Principales nuances normalisées : Les caractéristiques mécaniques varient selon les traitements et les dimensions.

- *Aciers à faible teneur en carbone (<0,3%) :* Ils sont réservés à la cémentation (voir traitement thermique) et aux traitements de surface (catégorie des aciers doux).
- *Aciers à teneur moyenne en carbone (0,3 à 0,5%) :* Ils sont utilisés pour les trempes et les revenus, dans le cas d'applications exigeant une plus grande résistance et une certaine tenue à l'usure (catégorie des aciers mi-durs). Ils sont utilisés pour les pièces moulées et forgées, les

arbres les axes, les engrenages, la visserie...

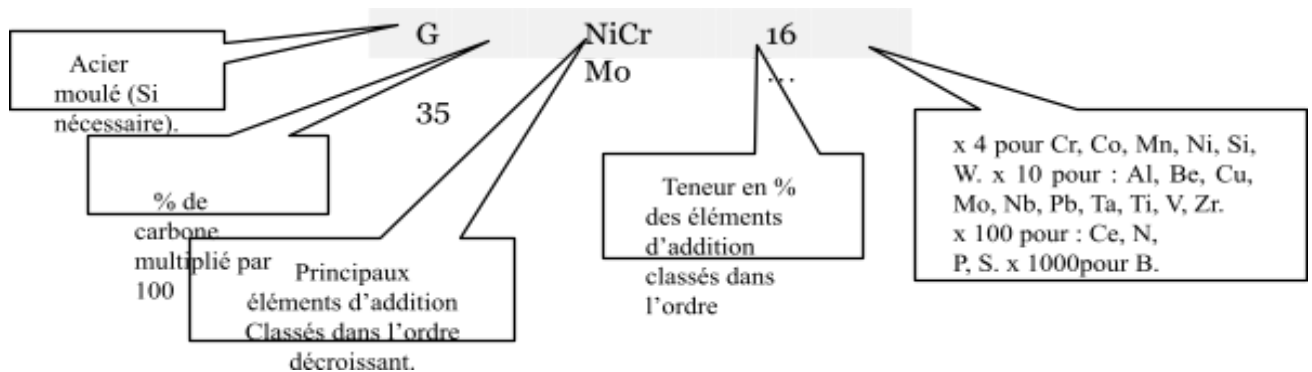
- *Aciers à haute teneur en carbone (>0,5 %)* : Ils sont employés pour des applications exigeant : grandes duretés, haute résistance, tenue à l'usure. Ils ont tendance aux déformations après trempe. Ils perdent leurs propriétés aux hautes températures. Ne durcissant pas en profondeur ils sont surtout utilisés pour des pièces petites en volume ou minces : (Pièces forgées, ressorts, lames, rasoirs, forets, matrices...).

Exemple : C55 (XC55) ; C60 ; C65 ; C70 ; C80 (XC 80).

III. Aciers faiblement alliés pour haute résistance :

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5 % en masse ($Mn \geq 1 \%$). Ils sont choisis chaque fois qu'une haute résistance est exigée. Ils sont utilisés en l'état ou avec traitement.

Désignation : La désignation comprend le pourcentage en carbone multiplié par 100, suivi des symboles chimiques des principaux éléments d'addition classés en ordre décroissant. Puis, dans le même ordre, les pourcentages de ces mêmes éléments multipliés par 4, 10, 100 ou 1000 plus au besoin des indications complémentaires.



Exemple : G 35 NiCrMo 16 (0,35 % de carbone, 4 % de nickel et des traces < 1 % de chrome et de molybdène, G = acier moulé).

1. Aciers de cémentation (% en carbone < 0,2 %) :

En plus de la cémentation, ils peuvent recevoir une trempe dans la masse : trempabilité fonction de la composition.

2. Aciers pour trempe dans la masse :

Ils permettent la trempe en profondeur des pièces massives, et sont beaucoup plus performant que les aciers de type C.

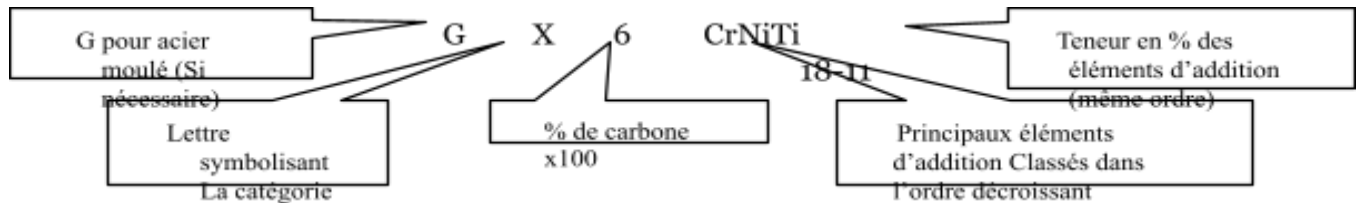
Classement par résistances croissantes possibles : 28Mn6, (20MnCr5 – 38Cr2 – 46Cr2 – 20NiCr6 – 20CrMo4), (41Cr4 – 30NiCr11 – 34CrMo4 – 41CrAlMo7), (55Si7 – 45SiCrMO6), (42CrMo4 – 51CrV4 – 50CrMo4), (34CrNiMo6 – 31CrMo12 – 30CrNiMo8 – 36NiCrMo16).

Remarque : L'acier 100Cr6 existe dans les variantes 100CrMn6, 100CrMo7.2, 100CrMnMo8 etc.... et il est utilisé pour les roulements.

IV. Aciers fortement alliés :

Ils sont destinés à des usages particuliers (inoxydables...). Pour ces aciers au moins un élément d'addition dépasse la teneur de 5 % en masse.

Désignation : La désignation comprend la lettre X, symbolisant la famille, suivie des mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés. Avec la seule différence c'est que pas de coefficient multiplicateur pour les pourcentages des éléments d'addition.



Exemple : G X 6CrNiTi18-10 : (0,06 % de carbone, 18 % de chrome, 11 % de nickel et des traces de titane (< 1%), G pour acier moulé.

1. Aciers inoxydables :

Famille très importantes, caractérisée par une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud, au fluage (déformation sous des contraintes pour des longues durée) et subdivisée suivant la teneur en nickel (2,5 %).

Aciers inoxydables austénitiques (Cr + Ni) :

Ces aciers, les plus utilisés sont les plus résistants à la corrosion (Ni > 7 %). Leurs caractéristiques sont :

- ☐ Bonne tenue aux températures élevées.
- ☐ Ductilité (A % élevé).
- ☐ Bonne résilience.
- ☐ Facile à forger et à souder.
- ☐ Usinabilité médiocre.
- ☐ Ils peuvent être durcis par corroyage (écrouissage) mais pas par trempe.
- ☐ Leur degré de dilatation est élevé et leur conductibilité thermique est assez

basse. Ces aciers existent sous de nombreuses nuances.

Applications : (Chimie alimentaire, transports, nucléaire...) : pièces emboutis, chaudronnées, cuves réservoirs, armatures, vannes visserie...

Aciers inoxydables ferritique (au chrome) :

Ils sont toujours ductiles ne durcissent ni par trempe (C < 0,08 %) ni par écrouissage, ils sont faciles

à étirer, former, plier, forger, rouler ($\text{Ni} < 1 \%$), les moins résistant à la corrosion. Leurs caractéristiques sont :

- Les plus économiques.
- Usinabilité médiocre.
- Soudabilité moyenne.
- Peu résilient.
- Faible résistance à la rupture (R_r) sous les températures élevées.

Applications : Equipements ménagers, décoration intérieure, automobiles, mobiliers...

Aciers inoxydables martensitiques ($0,08 \leq C \leq 1 \%$) :

- Résistent aux chocs.
- Durcissent par trempe.
- Soudables à chaud.
- Faciles à forger.
- Bonne usinabilité et bonnes caractéristiques mécaniques à température élevée ($Ni < 7 \%$).
- Résistent moins à la corrosion que les précédents

Exemple : X 30Cr13 existe en X 12Cr13, X 20Cr13, X 39Cr13, X 46Cr13 et X 12CrS13.

Applications : Composants divers (toutes industries), couteaux ressorts...

Aciers inoxydables à durcissement par précipitation :

Comme les aciers martensitiques en plus ils sont plus résistants à la corrosion et mécaniquement (après trempe).

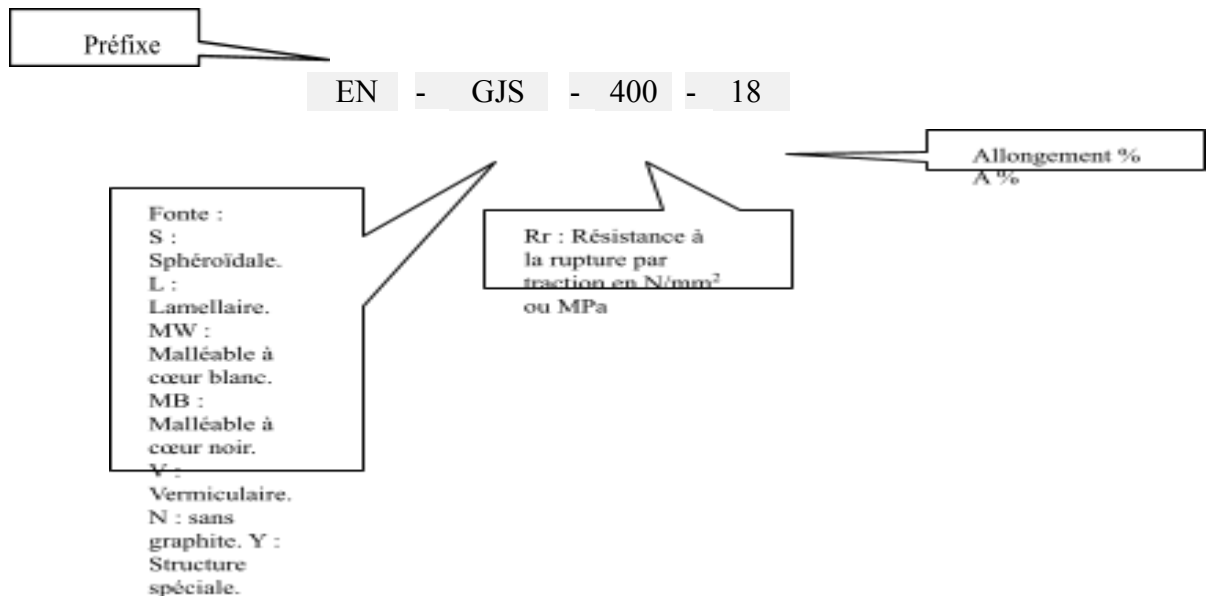
Autres familles d'acier :

- *Aciers moulés* : GS200, GS240, G15Mn5, G20Mn5, G24Mn6 (Aciers non alliés).
- G10MnMoV6-3, G18NiMoCr3-6, GX4CrNiMo16-5-1, GX2CrNi23-13, X8CrNi25-21 (Aciers alliés).
- *Aciers réfractaires* : Pour température $650 < T^\circ \text{C} < 1150^\circ \text{C}$: X12CrNi23-13, X8CrNi25-21.
- *Aciers à outils* : Alliés pour travail à froid ou à chaud (usure, choc, température) ;
aciers rapides (au Cr + W + Mo + V) : HS6-5-3, HS18-0-2-9
- *Aciers pour roulements* :

V. Les fontes :

Leur grande coulabilité permet d'obtenir des pièces de fonderie aux formes complexes. A cause du

pourcentage élevé de carbone qu'elles contiennent (entre 2 et 4 %), elles sont en général assez fragiles, peu ductiles (inadaptées aux déformations à froid : forgeage, laminage...) et difficilement soudables.



1. Fonte à graphite lamellaire EN-GJL (ex FGL) :

Les plus économiques, les plus utilisées, ce sont les fontes de moulage par excellence. Le carbone se présente sous forme de fines lamelles de graphite qui lui donne une couleur « grise ».

Propriétés : bonne coulabilité, bonne usinabilité, grande résistance en compression et grande capacités d'amortissement des vibrations

Applications : Bâtis de machines, supports carters, blocs moteurs...

2. Fontes à graphite sphéroïdale EN-GJS (ex FGS) :

Ce sont les plus utilisées après les fontes à graphite lamellaire, obtenues par addition de petites quantités de magnésium juste avant moulage, le graphite s'agglomère pendant le traitement sous forme de nodules ou sphères d'où le nom sphéroïdale.

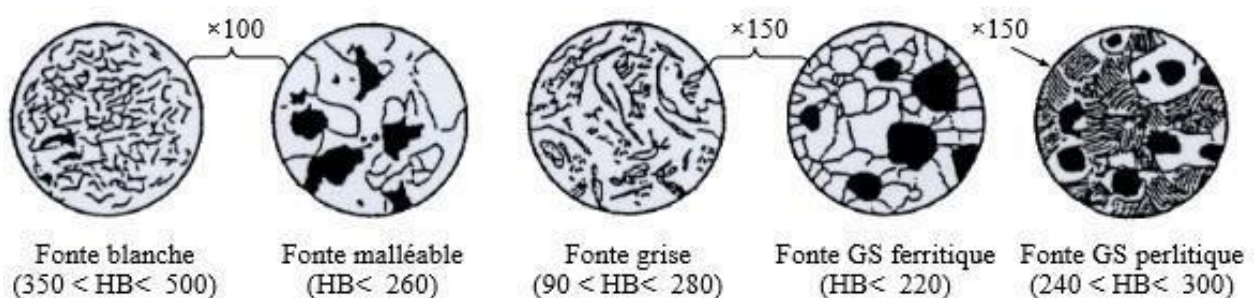
Propriétés : Ductilité, résilience et bonne usinabilité.

Applications : Vilebrequins, arbres de transmission, pièces de voitures, tuyauteries...

3. Fontes malléables : EN-GJMW et GJMB (ex FMB et FMN) :

Elles sont obtenues par malléabilisation de la fonte blanche et ont des propriétés mécaniques voisines de celles de l'acier. Elles peuvent être moulées en faibles épaisseurs et sont facilement usinables.

Applications : Carters, boîtiers...



Microstructures des fontes usuelles.

4. Autres familles :

Fontes blanches : à base de perlite et de cémentite (carbure Fe_3C), elles sont très durs, fragiles, résistantes aux frottements, à l'abrasion et aux températures élevées. Difficiles à usiner les applications sont limitées.

Fontes alliées : Elles peuvent être à graphite lamellaire, sphéroïdal ou blanches (En-GJN) et sont destinées à des usages particuliers. Les principaux éléments d'addition sont : le Nickel, le cuivre, le chrome, le molybdène et le vanadium. Ces éléments contrôlent plus ou moins la formation du graphite et développent des propriétés particulières.

VI. Aluminium et alliages :

1. Extraction de l'alumine à partir de la bauxite : procédé Bayer

L'industrie utilise un procédé inventé en 1887 par Bayer. La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine ; son nom vient du village des « Baux-de-Provence » où le français Pierre Berthier découvrit ce minerai en 1821. La bauxite contient l'élément aluminium sous forme d'oxyde hydraté $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ (n étant égal à 1, ou 3), également de la silice (SiO_2), de l'oxyde de titane (TiO_2) et de l'oxyde de fer(III), Fe_2O_3 .

2. Production d'aluminium par électrolyse de l'alumine : principe

Il n'est pas possible de réduire l'alumine par des réducteurs industriels tels que le carbone, le monoxyde de carbone ou le dihydrogène car l'aluminium est très réducteur. L'industrie fait appel à la réduction à la cathode d'un électrolyseur, moyen très puissant de réduction. Mais l'oxyde d'aluminium(III) ne peut pas être réduit en solution aqueuse car l'aluminium est plus réducteur que l'eau et c'est cette dernière qui serait réduite au lieu de l'ion aluminium(III). Par ailleurs, l'oxyde d'aluminium(III) est difficilement fusible comme toutes les espèces à structure ionique (ions Al^{3+} et O^{2-}). On s'en sert même comme revêtement réfractaire (température de fusion de 2045°C). Dans l'industrie, un mélange fondu de plus de 90 % de cryolithe (Na_3AlF_6) et de 7 % d'alumine est électrolysé. Ce mélange est beaucoup plus fusible que l'alumine pure. (Température de fusion de l'ordre de 1000°C). L'électrolyse de ce mélange ne consomme pratiquement que l'alumine et le carbone de l'anode qui réagit avec le dioxygène formé. On note néanmoins une consommation d'environ 30 kg de cryolithe par tonne d'aluminium. En simplifiant, l'équation de la réaction correspondant à l'électrolyse peut s'écrire : $4\text{Al}^{3+} + 6 \text{O}^{2-} \rightarrow 4\text{Al}(\text{s}) + 3\text{O}_2(\text{g})$

3. Désignation numérique des alliages d'aluminium :

Préfixe EN suivi d'un espace ; Suivi de la lettre A (qui représente l'aluminium ; Suivi de la lettre C (Cast= moulé) suivi d'un tiret ; Suivi d'un nombre à 2 chiffres qui représente le groupe et sous-groupe d'alliages (le premier de ces deux chiffres a sa signification indiquée dans le tableau suivant) ; Suivi d'un nombre à 3 chiffres qui est un numéro d'ordre arbitraire attribué à la nuance par la norme.	EN AC-42200
--	-------------

Groupe	Aluminium ou alliage d'aluminium
1	Aluminium non allié (teneur $\geq 99.00\%$)
2	Aluminium-Cuivre
3	Aluminium-manganèse
4	Aluminium-silicium

Désignation symbolique :

Préfixe EN suivi d'un espace ; Suivi de la lettre A (qui représente l'aluminium ; Suivie de la lettre C (cast= moulé) suivi d'un tiret ; Suivi de symbole chimique des éléments d'addition suivis chacun de leur teneur en pourcentage massique, dans l'ordre décroissant.	ENAC-ALSi7Mg0.6
--	-----------------

Les pourcentages des éléments minoritaires ne figurant pas forcément dans la désignation, mais ils sont néanmoins précisés dans la norme de définition de la nuance concernée.

Exemples de désignations symboliques et numériques des alliages d'aluminium de fonderie.

Correspondance avec la norme NF A 02-00 :

Désignation numérique	Désignation symbolique	Selon NF A 02-004
EN AC-21000	EN AC-AICu4MgTi	A-U4GT
EN AC-41000	EN AC-AISi2MgTi	A-52GT
EN AC-42000	EN AC-AISi7Mg	A-57G
EN AC-42100	EN AC-AISi7Mg0.3	A-57G0.3

Exemples de désignations symboliques et numériques des alliages d'aluminium de fonderie.

Correspondance avec la norme NF A 02-00 :

4. Alliages d'aluminium- produits

Corroyés Désignation numérique :

Préfixe EN suivi d'un espace ; Suivi de la lettre A (qui représente l'aluminium) Suivie de la lettre W (wrought = corroyé) suivi d'un tiret suivi d'un nombre à 4 chiffres;	ENAW-1070
--	-----------

Désignation symbolique :

Elle est destinée à compléter et expliciter la désignation numérique, placée entre crochets à la suite de celle-ci.

Symbole chimique de l'élément de base AL , pour le groupe 1, suivi du pourcentage de pureté exprimé avec une ou deux décimales, et éventuellement du symbole chimique de l'impureté principale ;	AL99.0Cu
Pour les autres groupes, suivi des symboles chimiques des éléments d'addition suivis chacun de leur teneur en pourcentage massique, dans l'ordre décroissant.	ALSi2Mn

Désignation numérique [symbolique]	Ancienne norme
EN AW-1100 [AL 99.0Cu]	A0
EN AW-1050 [AL 99.0]	A5
EN AW-1070 [AL 99.7]	A7
EN AW-1199[AL 99.99]	A99

Exemples de désignations symboliques et numériques d'alliages d'aluminium de corroyage.

VII. Cuivres et alliages :

Il existe plus de 200 alliages de cuivre. Les principales familles sont : Les laitons (Cu+Zn), les bronzes (Cu+Sn), les cupronickels (Cu+Ni), les cupro-aluminiums (Cu+Al) et les maillechorts (Cu+Ni+Zn).

Désignation : Elle comprend le symbole chimique du cuivre (Cu) suivi des symboles chimiques et teneurs des principaux éléments d'addition lassés par ordre décroissant.

Cuivre + Etain	Bronze
Cuivre + Zinc	Laiton
Cuivre + Aluminium	Cupro-aluminium
Cuivre + Nickel	Cupronickel
Cuivre + Nickel + Zinc	Maillechort

Exemple :

CuZn27Ni18 : (Maillechort) avec 27 % de Zinc et 18 % de Nickel.

Principales caractéristiques :

- Plus lourd que l'acier, de densité 8,9.
- Température de fusion vers 1083° C.
- Grande résistance à la corrosion.
- Plasticité ou ductilité élevée (A % jusqu'à 50 %).
- Grande conductivité électrique qui le rend indispensable dans les industries électriques et électroniques.
- Grande conductivité thermique.
- De couleur rouge plus ou moins foncée devenant « jaune » en addition avec le Zinc.
- Les cuivres et les alliages ne peuvent pas être traités thermiquement, sauf ceux au béryllium.
- La résistance Rr peut être augmentée par écrouissage à froid et la ductilité restaurée par revenu.

□ La trempe augmente la plasticité ce qui est le cas inverse des

aciers Les laitons :

C'est la famille la plus utilisée. L'addition de Zinc (jusqu'à 42 %) diminue le prix de base, augmente R_r et α % ce qui favorise l'emboutissage (α % = 60 % avec 31 % de Zn), et diminue la température de fusion, ce qui facilite le moulage.

Une addition supplémentaire de plomb de à 3 % augmente considérablement l'usinabilité. Les laitons ainsi obtenus (appelés laitons de décolletage) servent de référence pour évaluer l'usinabilité des autres matériaux.