
Département	Mécanique
Spécialité :	Master I
Semestre :	II / Année 2019- 2020
Intitule :	Traitements Thermiques
Chargé du module :	Pr. BACCOUCHE Mostefa

LE DIAGRAMME FER-CARBONE

Le diagramme Fe-C est une carte qui peut être utilisée pour suivre les séquences de solidification des alliages Fe-C et pour savoir ce qui se passe au cours de certains types de traitements thermiques.

Ce diagramme peut être considéré comme un guide, cependant la plupart des aciers contiennent, en plus du carbone, d'autres éléments d'alliage qui modifient la position de certaines courbes. Par ailleurs, le diagramme Fe-C ne peut être utilisé que dans les conditions d'équilibre (refroidissement à vitesse très faible). Or plusieurs traitements thermiques se font dans des conditions hors d'équilibre.

Pour les alliages Fe-C, on distingue 2 types de diagramme : le diagramme métastable Fe-Fe₃C et le diagramme stable Fe-C graphite (figure II-3). Le graphite est une forme du carbone plus stable que Fe₃C. Fe₃C peut se décomposer en graphite. Cependant ce phénomène n'a jamais lieu dans les aciers. Il a, par contre, lieu dans les fontes. C'est pour cette raison que pour les aciers, c'est le diagramme Fe-Fe₃C qui est exclusivement utilisé, alors que la technologie des fontes est beaucoup plus basée sur le diagramme Fe-C graphite.

1. Diagramme Fe-Fe₃C (Fer-Cémentite)

Le diagramme comprend 3 paliers caractéristiques qui correspondent à 3 types de transformation :

- T = 1495 °C : Transformation péritectique
- T = 1148 °C : Transformation eutectique
- T = 727 °C : Transformation **eutectoïde**

On distingue aussi 5 phases différentes (5 domaines monophasés) :

- La phase liquide vers les hautes températures
- La phase solide δ qui est une solution solide du carbone dans le fer δ , cette phase est appelée **ferrite** δ . La solubilité maximale du carbone dans cette phase est de 0,1 % et correspond à la température T=1495 °C. Comme le fer δ est cubique centrée
- La phase solide γ qui est une solution solide du carbone dans le fer γ , elle est dite **Austénite** γ . La solubilité maximale du carbone dans cette phase est de 2,11 % à T=1148 °C Comme le fer γ , l'austénite est C.F.C.

- La phase solide α qui est une solution solide du carbone dans le fer α , elle est dite ferrite α . La solubilité maximale du carbone dans cette phase est de 0.0218 à $T=727\text{ °C}$ Comme le fer α la **ferrite α** est CC
- Le composé défini Fe_3C , dit **cémentite** dont la composition en carbone est de 6,67%. La structure cristallographique de Fe_3C est orthorhombique.

On note d'une manière particulière certains points de transformation :

- $\text{AC}_1 : \gamma \text{-----} > \alpha + \text{Fe}_3\text{C} (727\text{ °C})$
- $\text{AC}_3 : \gamma \text{-----} > \alpha$ (début de transformation de γ en α au chauffage et AR_3 au refroidissement)
- $\text{AC}_m : \gamma \text{---} > \text{Fe}_3\text{C}$ (début de transformation de γ en Fe_3C au chauffage et AR_m au refroidissement)

Nous allons nous intéresser à la partie du diagramme qui correspond aux aciers : % C < 2,11, puis celle des fontes % C > 2,11

2. Les Aciers

Les aciers sont des alliages Fer-Carbone qui contiennent moins de 2% en masse de carbone. Deux types de transformation entrent en jeu : la solidification (transformation liquide-solide) et la transformation en phase solide. **a) Transformation Liquide-Solide**

Elle concerne la partie supérieure du diagramme (figure II-1) qui présente un palier péritectique; 3 cas se présentent :

Cas 1 : Au cours de la transformation péritectique, c'est le liquide qui disparaît :
Liquide + $\delta \text{-----} > \gamma$

Cas 2 : La fin de la transformation est marquée par la disparition des 2 phases L et δ .
Liquide + $\delta \text{-----} > \gamma$

Cas 3 : C'est δ qui disparaît à la fin de la transformation péritectique.
Liquide + $\delta \text{-----} > \gamma$

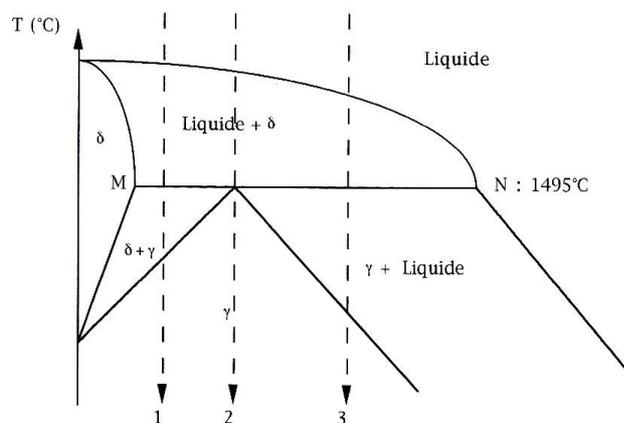
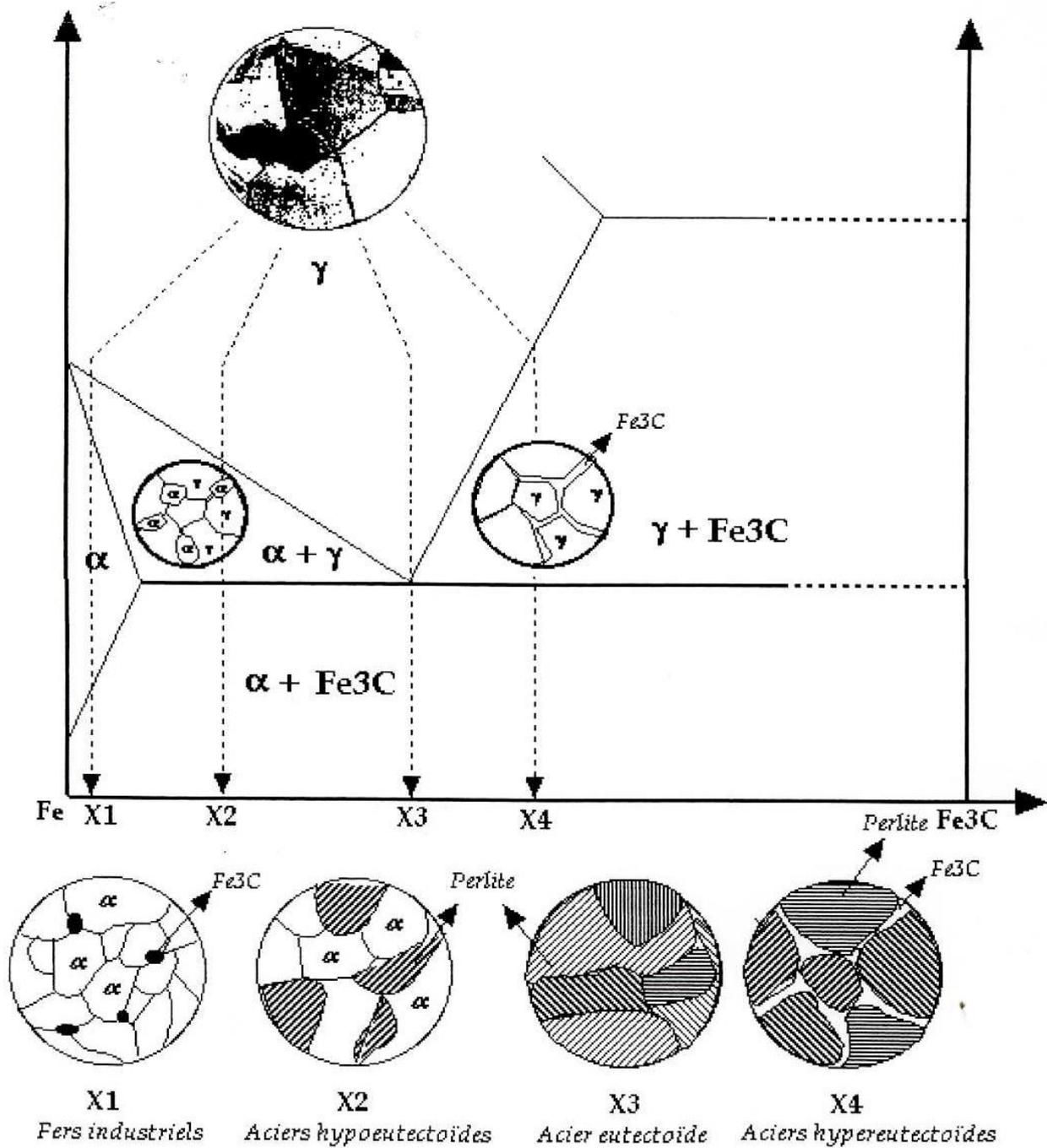


Figure II-1 : Partie supérieure du diagramme d'équilibre binaire Fer-C

ACIERS : TRANSFORMATIONS SOLIDE-SOLIDE



b) Transformation Solide-Solide

C'est des transformations très importantes à connaître étant donné que tous les traitements effectués sur les pièces métalliques après élaboration se font à l'état solide. La partie du diagramme Fe-Fe₃C concernée est la partie inférieure qui présente un palier eutectoïde à 727°C (figure II-2).

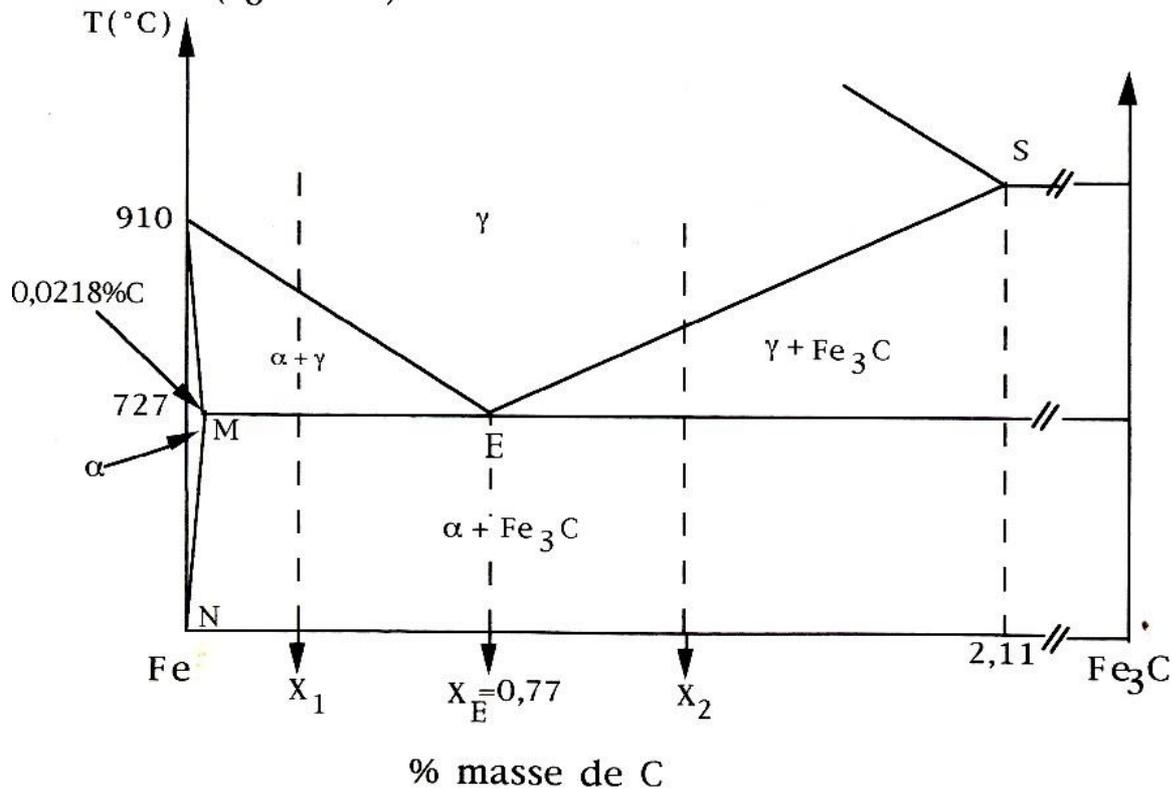
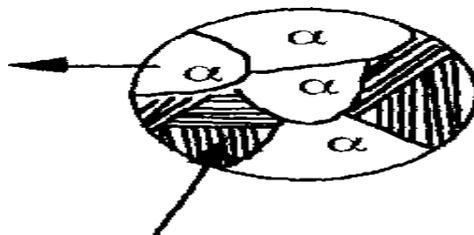


Figure II-2 : Partie "Aciers" du diagramme Fer-Cémentite

(1) Les aciers hypoeutectoïdes ($0,0218 < \%C < 0,77$)

Remarque : Quand % C augmente, AC₃ diminue



$\alpha + Fe_3C$ = composé eutectoïde = perlite

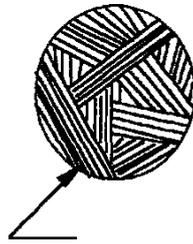
Quand X₁ augmente, % α diminue et % perlite augmente

* Que se passe-t-il au cours du refroidissement ?

Quand T diminue, la solubilité du carbone dans γ diminue. Au point AC₃, γ se transforme en α moins riche en carbone, α se formera au niveau des joints de grains de γ . Cette transformation se poursuit quand la température diminue. γ est alors enrichie en C (courbe AC₃-E'). Quand la teneur en carbone atteint 0,77 (E'), la transformation eutectoïde a lieu à température constante ($v=0$) jusqu'à l'épuisement de γ .

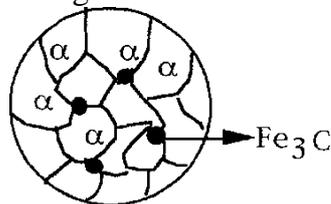
(2) Les aciers hypereutectoïdes : $0,77 < \%C < 2,11$

Remarque : Quand %C augmente, A3 augmente.



$\alpha + Fe_3C$ = composé eutectoïde
= perlite

2- Pour $X < 0,0218$ (ou proche), la phase dominante est la ferrite avec quelques précipités de cémentite aux joints de grains.



3. Les fontes ordinaires

Les fontes sont des alliages Fe-C dont le % en C va de 2 à 6. Pratiquement les fontes contiennent de 3 à 4% en C.

On désigne par fontes ordinaires des fontes qui n'ont pas subi de traitements particuliers après coulée (mis à part les traitements thermiques ordinaires). Leur solidification est donnée par la partie droite du diagramme d'équilibre. Quand le carbone y existe à l'état libre (graphite) on parle de fontes grises et on se réfère au diagramme Fe-C stable, dans le cas où il apparaît à l'état combiné avec le fer (Fe_3C), on parle de fontes blanches et on se réfère au diagramme Fe- Fe_3C métastable. La caractéristique de ces fontes par rapport à tous les autres alliages Fe - C c'est leur faible coût.

a) Les fontes grises

Elles contiennent le carbone sous forme de graphite (figure II-3). Le % en carbone des fontes grises se situe autour de 4,3%, celui de l'eutectique, ceci entraîne une bonne coulabilité et une faible tendance à la retassure (vides dans le lingot dus au phénomène de retrait au passage de l'état liquide à l'état solide).

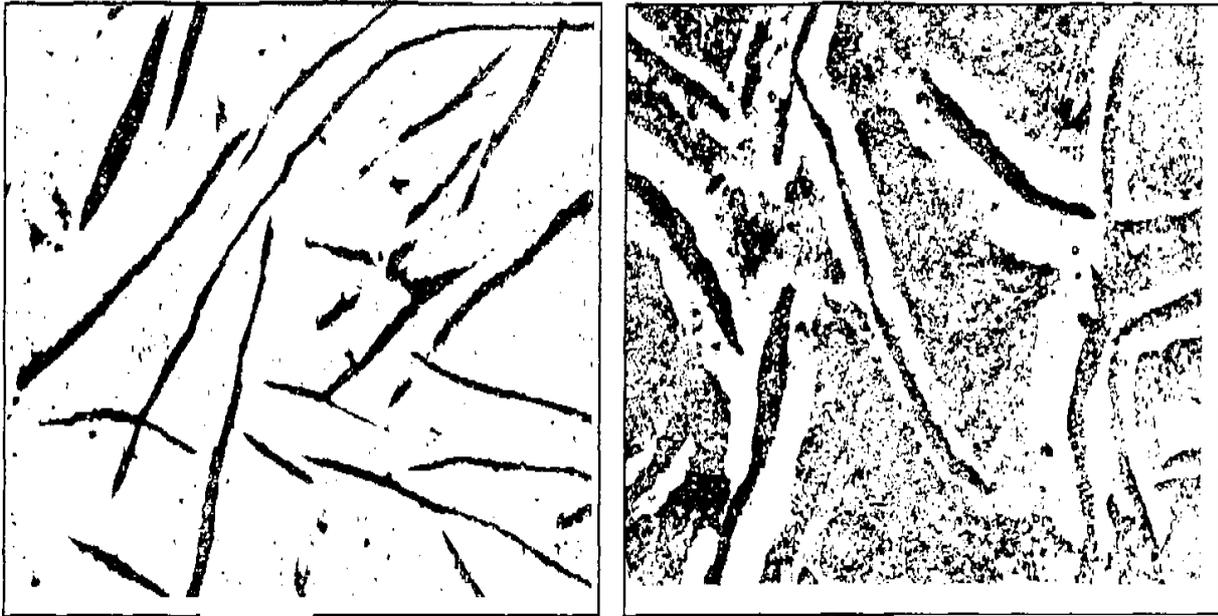


Figure II-3 : Aspect microstructural des fontes grises. (a) Aspect des lamelles de graphite, (b) fonte grise ferrito-perlitique : les lamelles de graphite sont entourées d'auréoles blanches de ferrite, le fond sombre est de la perlite.

Le graphite donne aux cassures un aspect gris d'où le nom fontes grises. On distingue les fontes grises hypoeutectiques ($\%C < 4,3$) et les FG hypereutectiques.

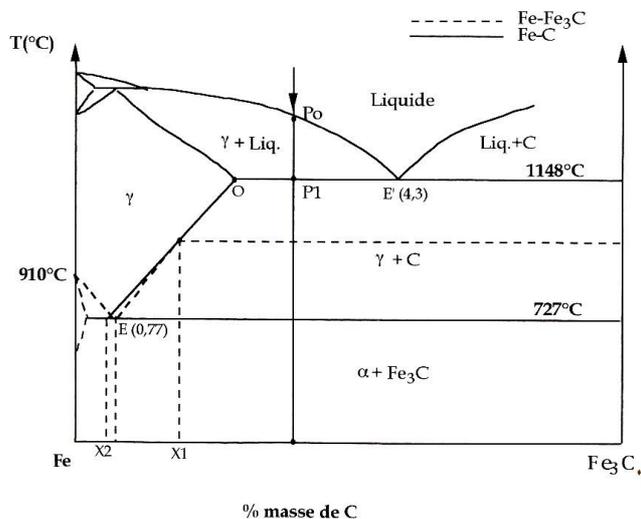


Figure II-4 : Diagramme Fe-C pour les fontes, en pointillés diagramme métastable et en ligne continue diagramme stable

- (1) **Les fontes hypoeutectiques ($2 < \%C < 4,3$)**
- (2) **Les fontes hypereutectiques ($\%C > 4,3$)**
- (3) **Propriétés des fontes grises**

Les fontes grises eutectoïdes (ou perlitiques) ont la meilleure tenue à l'usure et la meilleure résistance mécanique. C'est pourquoi les FG industrielles sont définies comme ayant un carbone équivalent voisin de 4%.

Il est important de noter que les structures souhaitées pour les FG sont obtenues à l'état brut de coulée ; en général aucun traitement thermique ultérieur n'est souhaité sauf dans le cas des trempes superficielles.

Les FG sont d'une manière générale faciles à usiner (dureté : 170 à 270 HB), mais elles ont une ténacité médiocre à cause du graphite.

Par ailleurs ce sont les fontes les plus utilisées pour les bâtis de machine du fait de leur grande capacité d'amortissement des vibrations et leur tenue au frottement (favorisée par la présence de graphite qui est un excellent lubrifiant). De plus, leur charge à la rupture par compression est de 3 À 5 fois plus grande que celle à la traction.

Désignation : Ft Rm (daN/mm²), exemple : Pt 10 fonte grise dont Rm=10 daN/mm².

b) Les fontes blanches

Le carbone γ existe à l'état de Fe_3C . Le Fe_3C donne à la cassure un aspect blanc et brillant d'où le nom de fontes blanches. La formation de la fonte blanche est favorisée par certains facteurs :

- la teneur en carbone, plus elle est élevée (vers l'eutectique), moins la formation est probable
- la composition ne doit pas contenir des éléments favorisant la formation de graphite (Si, Al, Ti, Ni, Cu). Il faudrait des éléments carburigènes (Mn, Mo, Cr, V)
- une vitesse de refroidissement élevée favorise la formation de fonte blanche.

Comme pour les fontes grises, il existe des fontes blanches hypo et hypereutectiques. Leur solidification suit exclusivement le diagramme métastable Fe- Fe_3C . Il est à signaler que dans le cas de la fonte blanche, le composé eutectique (la ledéburite) garde son aspect malgré la transformation de l'austénite la constituant.

(1) Fontes blanches hypoeutectiques

Les séquences de transformation de cette fonte à partir de l'état liquide sont :

- formation de γ proeutectique (jusqu'à 1148°C)
 - à 1148°C : formation de ledéburite ($\gamma+Fe_3C$)
 - formation de cémentite proeutectoïde et appauvrissement de γ en carbone (Jusqu'à 727°C)
 - à 727°C : l'austénite a un % en C=O, 8; elle se transforme totalement en perlite.
- Structure à l'ambiante (figure II-6) : Fe_3C eutectique et proeutectoïde + perlite (de γ proeutectique) et perlite (de γ eutectique).



Figure II-6 : Aspect microstructural d'une fonte blanche hypoeutectique dont le % en C est proche de 2,11. Plages noires : perlite, plages blanches : cémentite. X 200

(2) Fontes blanches hypereutectiques

Les séquences de transformation de cette fonte à partir de l'état liquide sont :

- Formation de Fe_3C primaire (ou proeutectique) (jusqu'à $1148^\circ C$)
- A $1148^\circ C$: formation ledéburite ($\gamma + Fe_3C$)
- Formation de Fe_3C secondaire (ou proeutectoïde) (jusqu'à $727^\circ C$)
- A $727^\circ C$: transformation totale de γ eutectique en perlite

Structure à l'ambiante (figure II-7 b) : matrice de Fe_3C (eutectique + proeutectoïde) + plaquette de Fe_3C primaire + perlite (de γ eutectique)

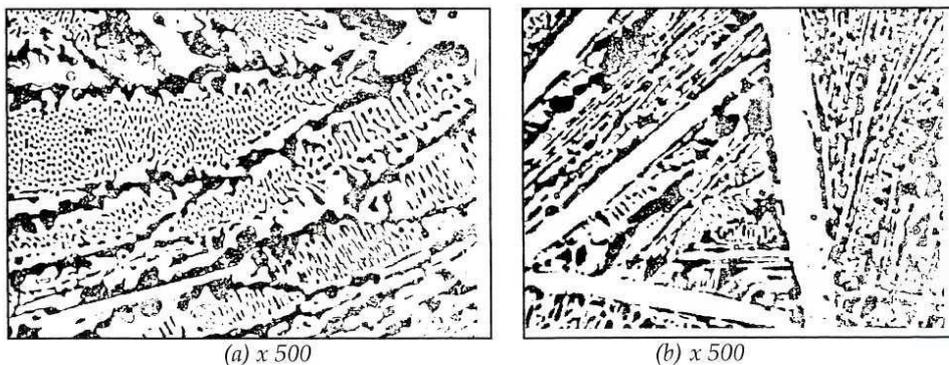


Figure II-7 : Aspect microstructural de la fonte blanche (a) eutectique (%C=4,3), plages mouchetées :

ledéburite, plages noires : perlite. (b) hypereutectique, plaquettes blanches de cémentite + plages mouchetées de ledéburite.

(3) Propriétés des fontes blanches

Les fontes blanches sont dures et fragiles, **elles sont** «inusables». Elles sont obtenues pour des vitesses de refroidissement assez élevées et des températures de coulées basses ; c'est pourquoi on les appelle parfois fontes trempées. Elles sont très peu utilisées dans l'industrie sauf dans le cas où leur grande résistance à l'usure et à l'abrasion est requise (boulets de broyeurs, mâchoires de concasseurs, plaques d'usure) Désignation : FB (FBO : non alliée, FBA : alliée)

C. LES DIFFERENTES STRUCTURES DES ACIERS ET DES FONTES

Nous avons défini l'acier et la fonte comme étant des alliages à base de fer. Nous avons aussi vu le processus de solidification de ces alliages suivant leur pourcentages en carbone dans les conditions d'équilibre et ceci à partir du diagramme binaire Fe-C.

Les conditions d'équilibre supposent que le refroidissement a lieu à des vitesses faibles pour permettre aux atomes de diffuser et former des différentes phases d'équilibre. Il est évident que les structures qui nous intéressent sont celles qui existent à la température ambiante, aussi allons nous porter notre étude sur les transformations en solution solide uniquement. La transformation solide-solide qui nous concerne aussi bien les aciers que les fontes est celle de l'austénite gamma que nous avons vue lors de l'étude du diagramme binaire Fe-C. Cependant, le refroidissement à des vitesses lentes ne sont pas ceux qui sont fréquemment pratiqués pour 2 raisons, les refroidissements à vitesses élevées sont plus rapides et donc d'un usage plus pratique, mais la raison principale est que celui-ci confère aux aciers des structures qu'on appelle hors d'équilibre qui ont des propriétés mécaniques différentes et diverses. Aussi, allons-nous diviser la présentation des structures de l'acier en deux : Les structures d'équilibre et les structures hors d'équilibre.

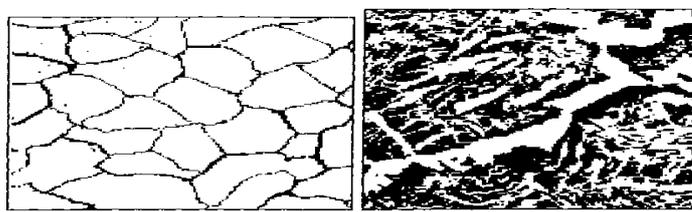
1. Les structures d'équilibre

Ce sont des structures qu'on obtient dans les conditions où la diffusion des atomes est possible. Les transformations qui leur donnent lieu sont dites contrôles par diffusion.

Elles ont lieu dans les aciers au carbone et les fontes ordinaires quand le refroidissement de l'austénite γ es relativement lent.

a) La ferrite

La ferrite a est relativement douce (dureté = 80 HB), sa résistance maximale R_m varie de 25 à 45 daN/mm² et sa limite d'élasticité $Re = 12$ daN/mm². C'est le composé proeutectoïde pour les aciers hypoeutectoïdes. Elle se présente soit sous forme de grains arrondis (ferrite granulaire) ; la ferrite ainsi formée ayant germée et s'étant développé le long des joints de grains de la phase mère austénite (figure II-8 a) soit sous forme allongée (ferrite aciculaire) due à une vitesse de refroidissement légèrement supérieure à celle des conditions d'équilibre, la structure est dite "WIDMANSTATTEN (figure II-8b). Cette ferrite naît aux joints de grains et se développe à l'intérieur du grain.



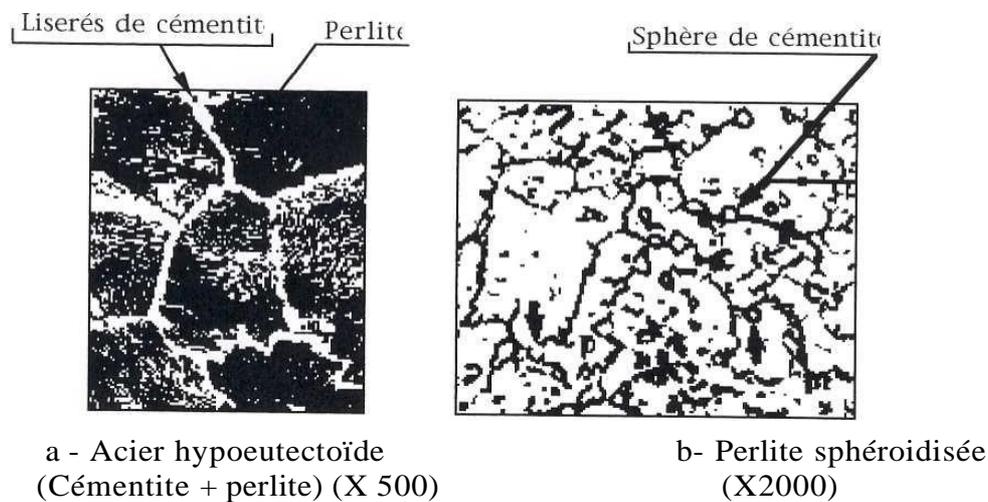
Ferrite granulaire (x250)

b- Ferrite aciculaire (x100)
(Structure de Widmanstätten)

Figure II-8 : Différentes morphologies de la ferrite

b) La cémentite

C'est le composé proeutectoïde qui se forme dans les aciers hypereutectoïdes; Il se forme aussi dans les fontes blanches. C'est un carbure Fe_3C , par conséquent sa dureté est très élevée (1000HV), c'est un produit fragile. Dans les aciers, comme la ferrite granulaire, la cémentite se forme aux joints de grains de la phase γ et s'y développe. C'est pour cette raison que la cémentite apparaît toujours comme des liserés blancs qui dessinent les contours des anciens grains de γ (figure II -9a)



a - Acier hypoeutectoïde
(Cémentite + perlite) (X 500)

b- Perlite sphéroidisée
(X2000)

Figure II-9 : Différentes présentations de la cémentite et la perlite

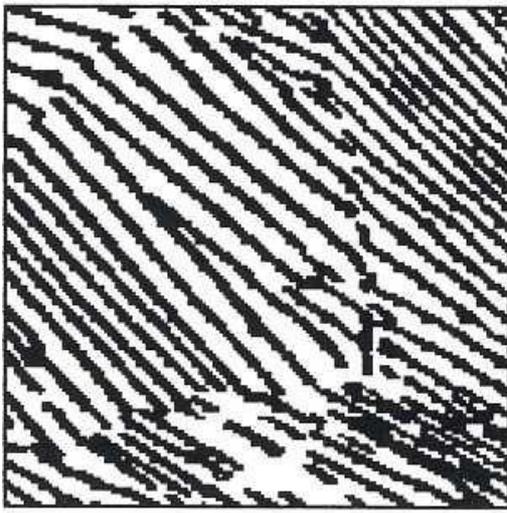
Dans les aciers hypereutectoïdes usuels (% C ne dépassant pas 1,2%), le pourcentage maximal de Fe_3C qui peut se former est de 7%. La cémentite ainsi formée peut porter préjudice à certaines propriétés importantes de l'acier, notamment son usinabilité et sa ténacité. Certains traitements sont donc appliqués aux aciers pour éliminer les liserés de cémentite (figure II-9 b) et lui donner un aspect de sphère (sphéroïdisation).

c) La perlite

Composé biphasé comportant des lamelles alternées de α et Fe_3C , c'est le composé eutectoïde. Sa dureté varie entre 180 et 250 HB, sa résistance maximale est autour de 83 daN/mm^2 .

La distance d entre 2 lamelles de Fe_3C dépend de la température T à laquelle la perlite s'est formée ou de la vitesse de refroidissement (V_R). Quand T diminue, d diminue et quand V_R augmente, d augmente. De d dépendra la résistance de la perlite :

$d=1 \mu\text{m}$	$R = 63 \text{ daN/mm}^2$ (figure II-10a)
$d= 0,5\mu\text{m}$	$R= 75 \text{ daN/mm}^2$ (figure II-10b)
$d=0,2 \mu\text{m}$	$R= 110 \text{ daN/mm}^2$
$d < 0,1 \mu\text{m}$	$R= 250 \text{ daN/mm}^2$



a- Perlite ($d=1 \mu\text{m}$)
(X 1000)



b-Perlite ($d<0,5\mu\text{m}$)
(X 1000)

Figure II-10 : Morphologie de la perlite

La sphéroïdisation de la cémentite (élimination des lamelles) conduit à des résistances R plus faibles (de 63 à 90 da N/mm^2 en fonction du diamètre des sphères), mais réduit la fragilité du produit.

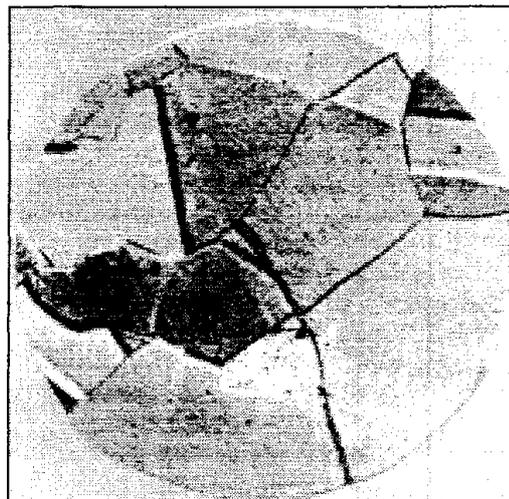
d) L'austénite

Pour les aciers au carbone et les fontes non alliées, l'austénite est stable seulement aux températures élevées, elle n'existe donc pas à la température ambiante. Cependant, elle influencera beaucoup les propriétés de ces aciers étant donné que aussi bien les phases eutectoïdes que la perlite prennent naissance (germent) au niveau des joints de grains de cette phase qui est la phase mère. Ainsi, si les grains de cette phase sont gros, il y aura peu de joints de grains, donc peu de sites de germination et la transformation de l'austénite γ sera retardée (γ étant stabilisée). De plus, il y aura une relation entre la taille des grains de γ et celles des grains des phases qui se forment : plus γ sera fine plus les produits seront fins et la résistance de l'acier meilleure. La taille du grain de γ dépend de la température et du temps auxquels on maintient l'acier avant refroidissement.

Quand T et t augmentent, le diamètre du grain augmente. Dans les aciers et les fontes qui contiennent des éléments d'alliage, l'austénite peut être présente à la température ambiante} et par conséquent stabilisée si les éléments sont gamma gènes (Ni, Co, Mn...)

Morphologie : l'austénite se présente sous forme de grains polygonaux (figure II-11). Elle peut avoir des duretés très élevées jusqu'à 800 HB) et des résistances importantes ($R=90 \text{ daN}/\text{mm}^2$) suivant les éléments d'alliage.

Sa limite d'élasticité dans ce cas sera très faible.



2. Les structures hors d'équilibre

a) La martensite (du nom d'Adolf Martens, allemand)

Lorsque la vitesse de refroidissement d'un acier porté à haute température est très élevée, on n'est plus dans les conditions d'équilibre.

Ainsi, les atomes de carbone de l'austénite (haute température) n'auront pas le temps de diffuser lors du refroidissement rapide. Ils resteront emprisonnés dans le réseau de la ferrite alpha (basses températures) qui normalement ne peut pas les contenir (limite de solubilité du carbone dans α à 727°C : 0,025%). Ils déformeront ainsi le réseau qui se transformera alors de cubique à faces centrées (γ) en quadratique centré identifié par les paramètres c et a : C'est la martensite qui est définie comme étant une solution solide sursaturée en carbone.

Quand %C augmente, c/a augmente et la tétragonalité du réseau sera plus prononcée (figure II-12).

Cette déformation du réseau} qui se fait par cisaillement (la transformation martensitique est dite militaire comparativement aux transformations diffusionnelles dite civiles), entraîne des distorsions et donc le durcissement de l'acier. La martensite sera donc une phase dure (HRC=73).

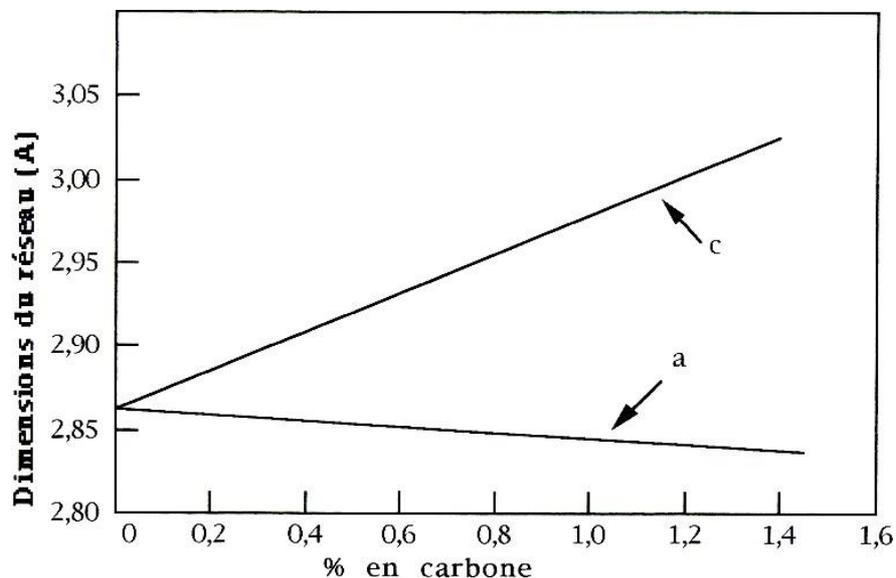


Figure II-12: Variation des paramètres a et c de la martensite en fonction de la teneur en carbone dans les alliages Fe-C (Ref .1)

b) La bainite (du nom d'Edgar Bain, Américain)

Quand la vitesse de refroidissement n'est pas très élevée, mais intermédiaire, il se forme un composé intermédiaire entre la martensite et la perlite qui groupe certaines propriétés de chacune des deux structures : c'est la bainite. Comme la perlite celle-ci est un composé biphasé contenant de la ferrite + cémentite ; comme la martensite elle se présente sous forme d'aiguilles de ferrite dans lesquelles est répartie la cémentite. Ainsi la transformation bainitique est permise par la diffusion partielle des atomes de carbone (transformation perlitique) et par le cisaillement (transformation martensitique). Du fait qu'elle est également assurée par la diffusion, la transformation bainitique peut progresser même dans les conditions isothermes.

Bainite supérieur

Bainite inférieur

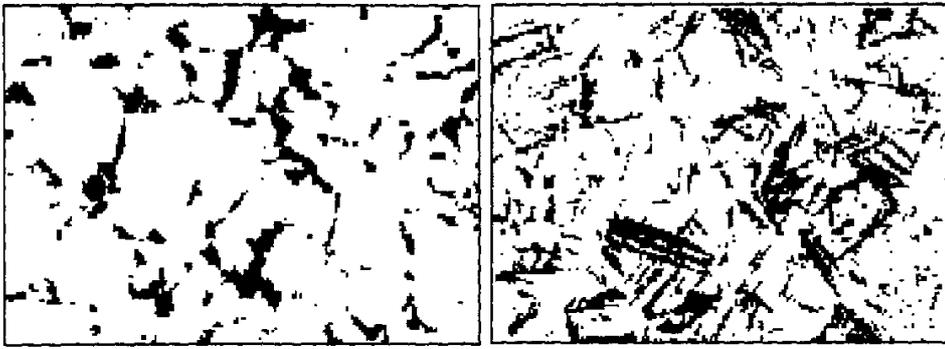


Figure II-16 : Morphologies de la bainite, x250

Les aiguilles de bainite seront d'autant plus fines que la vitesse de refroidissement est élevée ou que la température est basse (dans les conditions isothermes) ; on distingue ainsi trois types de bainite :

-bainite supérieure : pour les températures relativement hautes, elle est proche de la perlite, la structure se présente sous forme de lamelles de ferrite a entre lesquelles se trouvent les précipités de cémentite Fe_3C ,

-bainite moyenne

-bainite inférieure : pour les températures basses, elle est proche de la martensite, les aiguilles sont très fines et ne peuvent pas être résolues au microscope optique. Les carbures de cémentite y sont très petits et parallèles.

La bainite est assimilée à des amas de plumes. Lorsque la vitesse de refroidissement augmente la structure devient plus fine, par ailleurs les contraintes internes deviennent plus importantes ce qui engendre une dureté plus élevée.