

## 4. DIAGRAMME FER-CARBONE

### 4.1. Le fer et ses caractéristiques

Le fer est le métal de base le plus important pour les alliages techniques. Il est relativement abondant dans l'écorce terrestre (4,7 % en masse) sous forme d'états combinés dans de nombreuses roches. Le fer pur n'est pas employé dans l'industrie, les plus employés sont les alliages de fer avec le carbone qui sont la fonte et l'acier. Le fer pur est obtenu soit :

- Par électrolyse des sels de fer (fer électrolytique).
- Par décomposition thermique du pentacarbonyl de fer ( $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ).
- Par recuit de longue durée du fer doux dans un courant d'hydrogène à des températures de 1000°C à 1400°C.

Avec 99,9 % de fer, il est déjà pur, mais il contient toujours des trous de différents éléments. Le fer le plus pur qui peut s'obtenir actuellement contient 99,999 % de fer. Le fer est de couleur blanche possédant les caractéristiques suivantes :

- Masse atomique : 55,85.
- Nombre atomique : 26.
- Rayon atomique 1,27 Å (CFC).
- Masse volumique 7,8 g/cm<sup>3</sup>.
- Température de fusion 1539°C.

Il possède une dureté HB de 60 kp/mm<sup>2</sup>, une contrainte limite de traction d'environ 20 kp/mm<sup>2</sup> et une faible limite d'élasticité. C'est un bon conducteur de chaleur et d'électricité (une résistivité électrique à 20°C de  $9,76 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ). Grâce à sa grande perméabilité magnétique, il est très utilisé dans l'électrotechnique. Les propriétés magnétiques du fer dépendent dans une grande mesure de sa pureté et des régimes de traitement thermiques.

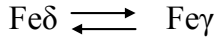
On connaît deux formes (variétés) allotropiques du fer (deux réseaux cristallins différents). Le fer  $\alpha$  dont le réseau est cubique centré (CC) et le fer  $\gamma$  dont le réseau est cubique à faces centrées (C.F.C). Le phénomène de la modification du réseau cristallin sous l'effet de la température porte le nom de transformation allotropique.

Ces transformations sont établies grâce aux paliers thermiques des courbes de refroidissement ou de chauffage. Les courbes (fig.119) de chauffage ou de refroidissement du fer sont caractérisées par plusieurs points d'arrêt (point critique ou palier) correspondant à des températures définies pour des transformations déterminées.

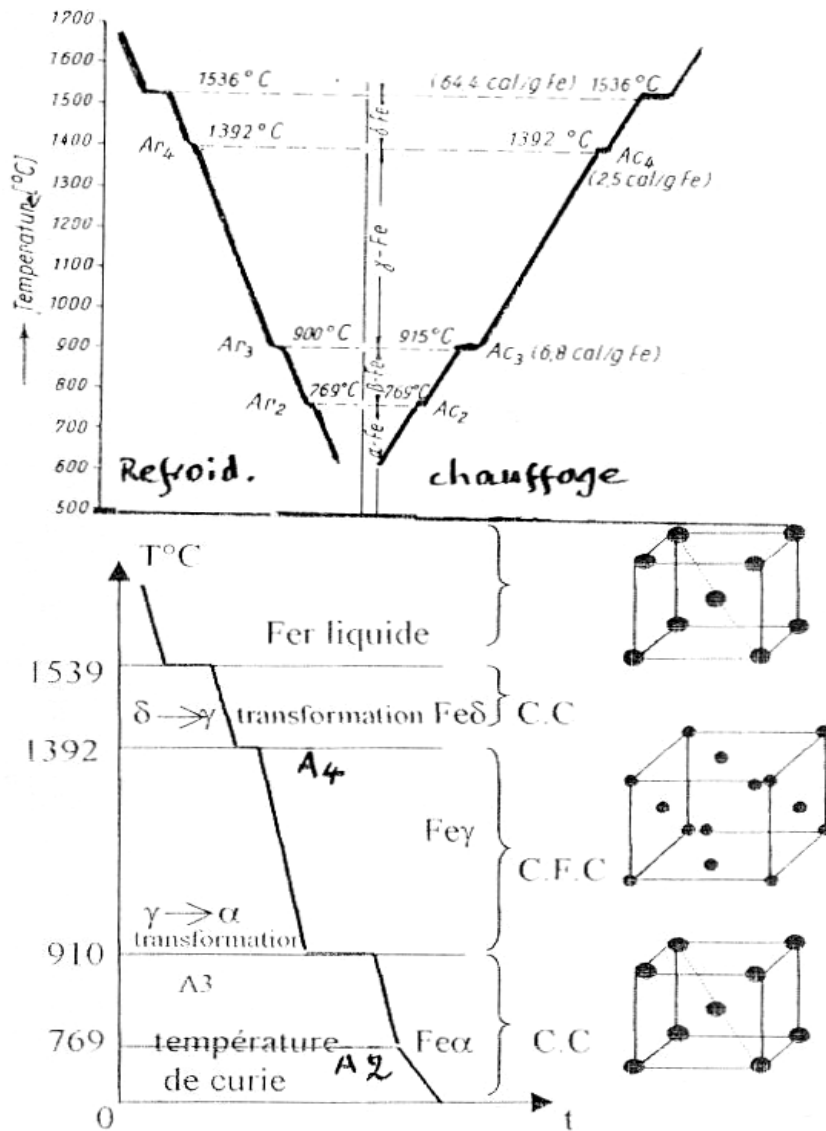
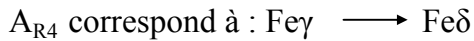
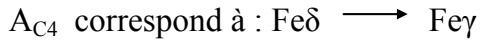
Le fer  $\alpha$  existe aux températures inférieures à 910°C et supérieures à 1392°C. Aux températures supérieures à 1392°C, le fer  $\alpha$  est désigné par Fe $\delta$ . Le fer  $\alpha$  possède un réseau cubique centré, il est magnétique jusqu'à la température de 768°C. Cette température est appelée point de curie, qui correspond à la transformation magnétique.

Le Fer  $\gamma$  existe entre 910°C et 1392°C, il est paramagnétique et il a un réseau cristallin cubique à faces centrées. Si on étudie les courbes de refroidissement et de chauffage, on peut

constater les transformations suivantes : le premier point d'arrêt apparaît à la températures de 1539°C (température de fusion du fer). Avec Abaissement de la température, la totalité du fer se solidifie et se cristallise à la température de 1392°C, à cette température, il y a apparition du deuxième point d'arrêt correspondant à la transformation :



Ce point est désigné par  $A_{C4}$ , ou  $A_{R4}$ , respectivement pour le chauffage ou le refroidissement :



(fig. 93) courbe de refroidissement du fer pur

( fig.119 )

Le troisième point critique (palier) se trouve à la température de 911°C, ce point est désigné par  $A_{C3}$ , ou  $A_{R3}$ .

$A_{R3}$  correspond à la transformation :  $Fe\gamma \longrightarrow Fe\alpha$  lors du refroidissement.

$A_{C3}$  correspond à la transformation :  $Fe\alpha \longrightarrow Fe\gamma$  lors du chauffage.

Le quatrième point est désigné par  $A_{R2}$  ou  $A_{C2}$ , correspondant à la transformation magnétique dont la température est de 768°C, appelé aussi point de curie, au dessus de cette température le fer perd ses propriétés magnétiques et devient paramagnétique. Si on examine un morceau de fer à l'aide d'un aimant à la température de 750°C et 800°C, on constate qu'à 750°C, il est toujours attiré par l'aimant, tandis qu'à 800°C, il n'est plus attiré. Au dessous de  $A_{R2}$  ou  $A_{C2}$  on a la présence du  $Fe\alpha$ .

Le tableau ci-après, résume les caractéristiques des différentes phases :

Phase	Réseau Cristallin	Constante du Réseau en mm	Domaine D'existence	Solubilité Maximale	Désignation structure
$Fe\delta$	CC	$a = 29,3$ - $T = 1425^\circ\text{C}$	$1536 > T > 1392^\circ\text{C}$	$0,10\%$ - $T = 1493^\circ\text{C}$	$\delta$ -Ferrite
$Fe\gamma$	C.F.C	$a = 36,4$ - $T = 1100^\circ\text{C}$	$1392 > T > 911^\circ\text{C}$	$2,06\%$ - $T = 1147^\circ\text{C}$	Austénite
$Fe\alpha$	CC	$a = 28,66$ - $T = 20^\circ\text{C}$	$T < 911^\circ\text{C}$	$0,02\%$ - $T = 723^\circ\text{C}$	Ferrite
$Fe_3C$	Rhombo-édrique	$a = 45,15$ $b = 50,84$ - $T = 20^\circ\text{C}$ $c = 67,30$	$T < 1330^\circ\text{C}$		Cémentite

#### 4.2. Le carbone et ses caractéristiques

C'est un élément non métallique peut abondant, (0,1% en masse dans l'écorce terrestre). Il est rare à l'état libre, on le rencontre à l'état combiné dans toutes les substances végétales et animales comme dans le pétrole, le charbon, le bois, la houille, etc. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Numéro atomique : 6.
- Masse atomique : 12.
- Rayon atomique : 0,77 Å.
- Masse volumique : 2,5 g/cm<sup>3</sup>.
- Température de fusion : 3500°C.

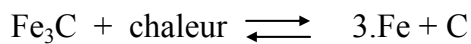
C'est un élément polymorphe et il existe deux variétés cristallines dans les conditions ordinaires, le diamant et le graphite. La variété du diamant est métastable à réseau cristallin C.F.C et il est classé comme le plus dur des corps solides, c'est aussi un isolant électrique.

Le graphite possède un réseau hexagonal simple, c'est un matériau réfractaire, relativement bon conducteur d'électricité. On l'utilise à l'état poudre pour les mines de crayons, pour la lubrification (combinaison de graphite et de graisse), dans les bronzes graphités ou encore en suspension colloïdale.

Le carbone dont le point de fusion est supérieur à 3500°C est soluble dans le fer et peut se cristalliser à l'état pur en formant le graphite ou se combiner avec le fer en formant une phase intermétallique Fe<sub>3</sub>C appelée cémentite ou carbone de fer.

La phase inter métallique cémentite a une structure très compliquée et elle est très dure (HB = 800kp/mm<sup>2</sup>). La Formation du graphite ou de la cémentite dépend des éléments d'alliage qui accompagnent le fer et surtout du type de refroidissement (vitesse de refroidissement).

Lorsque le refroidissement du métal liquide est lent les atomes de carbone se cristallisent en formant le graphite et dans le cas contraire lorsque le refroidissement est rapide on a la formation de la cémentite (Fe<sub>3</sub>C), qui ne peut se décomposer à la température ambiante, mais à un maintien de température supérieure à 500°C et d'une durée très longue. La cémentite peut se décomposer en graphite suivant la réaction :



La présence aussi du silicium peut favoriser la décomposition de la cémentite (formation du graphite). Donc on a l'existence de deux diagrammes d'équilibres :

- Le diagramme d'équilibre métastable Fe-Fe<sub>3</sub>C (cémentite).
- Le diagramme d'équilibre stable fer-graphite.

#### 4.3. Diagramme d'équilibre : Fer-cémentite

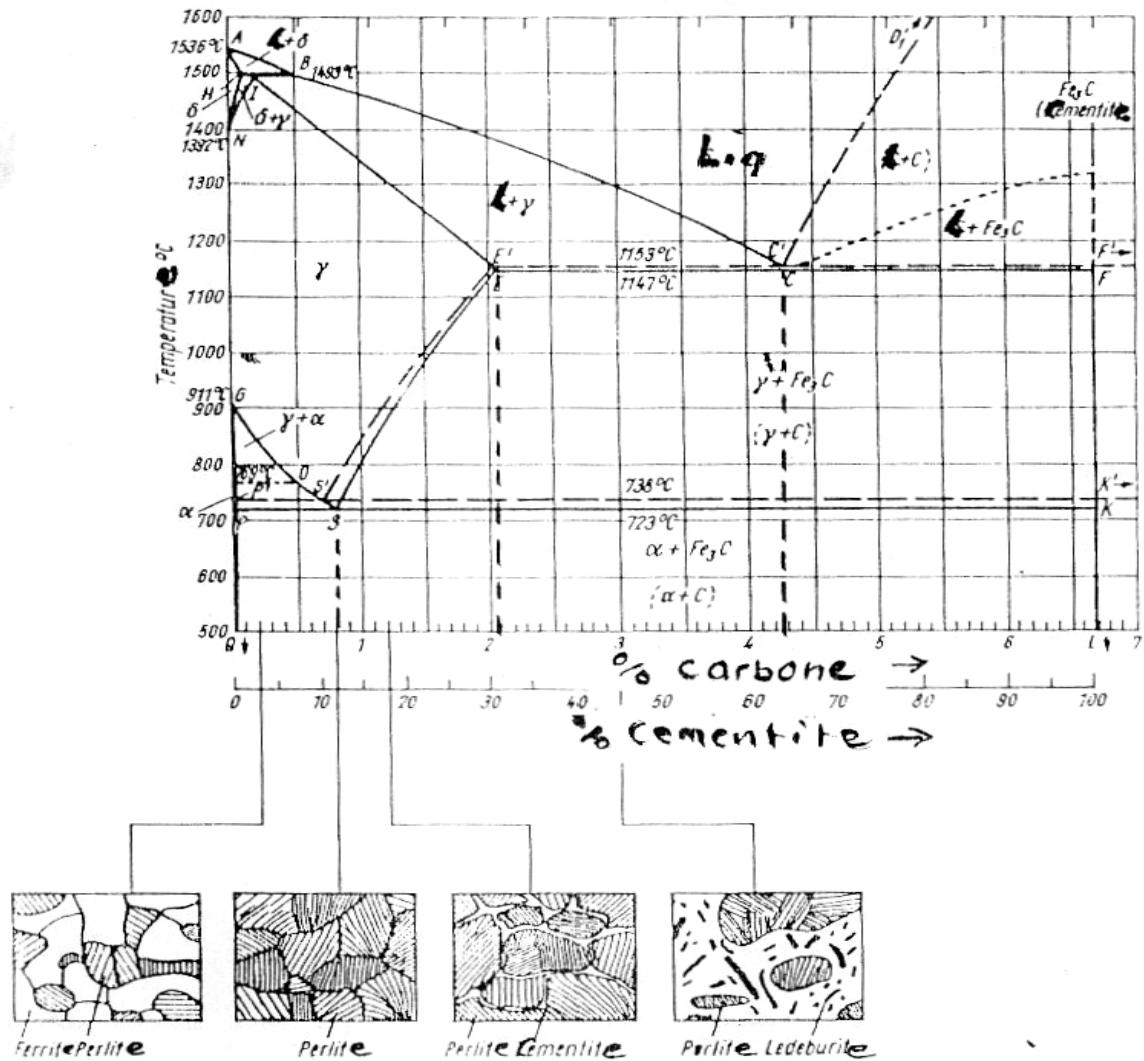
C'est le diagramme d'équilibre Fer-carbone métastable. Il représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite. La cémentite correspond à 6,67 % de carbone.

La figure 120 représente à la fois les deux diagrammes, celui représenté par des traits en pointillés correspondant au diagramme stable fer-graphite et l'autre en trait continu correspondant au diagramme métastable fer-cémentite.

Pour des températures élevées, la cémentite se décompose en fer et en carbone et c'est la cause qui ne laisse pas connaître la température de fusion de la cémentite, on considère sa température de fusion à environ 1392°C et peut être, elle est plus élevée.

Sur la figure 120, le fer pur représente la partie limite gauche et la cémentite la partie limite droite. La cémentite contient 6,67 % de carbone. Les alliages de fer et de carbone contenant plus de 6,67 % de carbone n'ont aucun intérêt dans l'industrie, à part les ferro-manganèses qui contiennent de 6 à 8 % de carbone.

Le diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C métastable, possède une structure analogue à celle du système eutectique plomb-antimoine. Les complications qui existent dans le fer sont les différentes modifications allotropiques du fer et les différentes capacités de dissolution du carbone. Les aciers et aciers de moulage se solidifient selon le système métastable, tandis que la solidification des fontes de moulage s'effectue, le plus souvent, suivant la forme stable et métastable suite à la haute teneur en carbone et en refroidissement lent.



( fig.120 )

#### 4.3.1. Les points caractéristiques du diagramme

- A : correspond à la température de fusion du fer pur (1539°C).
- D : correspond à la température de fission de la cémentite (1392°C).
- B : 0,51 % C dans la phase liquide en équilibre avec la ferrite  $\delta$  et l'austénite à la température péritectique 1493°C.
- H : 0,10 % C teneur limite du carbone dans la ferrite  $\delta$  à 1493°C.
- I : 0,16 % C dans l'austénite à la température péritectique 1499°C.
- N (1392°C) et G (910°C) marquent la transformation polymorphe réciproque ferrite-austénite ( $\delta \rightleftharpoons \gamma$ ).

- E : 2,1 % C teneur limite du carbone dans l'austénite à la température eutectique (ECF 1147°C).
- S : 0,8 % C dans l'austénite à la température eutectoïde 727°C.
- P : 0,02 % C teneur limite dans la ferrite à la température eutectoïde 727°C.
- C : 4,3 % C transformation eutectique à la température 1147°C.

Les liquides du diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C qui déterminent le processus de cristallisation ont la notation et le sens physique suivant :

- AB : liquidus qui matérialise la température de début de cristallisation de la ferrite δ à partir de l'alliage liquide.
- NH et NI : limite supérieure intérieure de la coexistence des deux phases ferrite δ et austénite (A).
- BC : liquidus qui marque le début de cristallisation de l'austénite A à partir de l'alliage liquide.
- CD : liquidus correspondant au début de cristallisation de la cémentite primaire (C<sub>ml</sub>) à partir de l'alliage liquidé.

Donc ABCD représente la ligne liquidus pour tout le diagramme au dessus de ABCD, tous les alliages sont à l'état liquide.

- AH : ligne de solidus traduisant les températures délimitant le domaine de l'alliage liquide et les cristaux Feδ. Au dessous existent uniquement les cristaux de ferrite δ.
- HIB : ligne de transformation péritectique (T = 1499°C, C = constante), A la température inférieure à 1499°C, on a l'amorce de la réaction péritectique (interaction du liquide de composition B avec les cristaux de fonte δ de composition H dégage de l'austénite de composition I.



- ECF : cette ligne correspond à la cristallisation de l'eutectique appelé lédéburite (L<sub>b</sub>).

Donc AHIECF représente la ligne de solidus, au dessous de cette ligne, tous les alliages se trouvent à l'état cristallin (solide).

Entre les lignes de solidus et de liquidus, tous les alliages se trouvent à l'état pâteux avec des composantes hétérogènes de liquide et de cristaux (ferrite, austénite, cémentite) ayant des compositions différentes et dans des portions variables.

Les alliages à teneur en carbone inférieure ou égale à 2,06 % C s'appellent aciers et dont la teneur en carbone est inférieure à 2,06 % C s'appellent fontes. Cette délimitation coïncide avec la solubilité limite du carbone dans l'austénite. L'austénite possède une structure très plastique, ce qui rend les aciers malléables, les fontes possèdent de bonnes

propriétés de fonderie, un point de fusion plus bas et des retraits plus petits dus à la présence dans la structure du composant eutectique lédéburite.

Les points de transformations des aciers jouent un rôle prédominant dans la détermination des températures des traitements thermiques (trempe, revenu, recuit et cémentation).

Ces points sont notés par  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  et  $A_{cm}$ , lors du chauffage ou du refroidissement sont notés respectivement par  $A_{C0}$ ,  $A_{C1}$ ,  $A_{C2}$ ,  $A_{C3}$  et  $A_{CCm}$  et  $A_{r0}$ ,  $A_{r1}$ ,  $A_{r2}$ ,  $A_{r3}$  et  $A_{rCm}$ .

- $A_0$  : ( $T = 210^\circ\text{C}$ ) correspond à la transformation lors du chauffage de la cémentite ferro-magnétique en cémentite non magnétique.
- $A_1$  : ( $T = 727^\circ\text{C}$ ) correspond à la transformation réversible perlite –austénite.
- $A_2$  : point de curie ( $T = 769^\circ\text{C}$ ), au dessus de cette température le fer perd ses propriétés magnétiques, cette température est marquée par ligne MO.
- $A_3$ , correspond aux températures associées à la ligne SE ( $C_m$  est le symbole abrégé de la cémentite)

Donc les lignes GOS et SE représentent le lieu des points  $A_3$  et  $A_{cm}$  définissant des températures variables.

Les points caractéristiques du diagramme fer-carbone stable et métastable sont donnés dans le tableau suivant :

Point	Température en °C	% de carbone
A	1539	0
B	1499	0,51
C	1147	4,30
D	1392	6,67
E	1147	2,06
F	1147	6,67
G	910	0
H	1499	0,10
I	1499	0,16
K	723	6,67
M	760	0
N	1392	0
P	727	0,02
Q	20	0,006
C'	1147	4,30
E'	1153	2,03
S'	727	0,69

A partir du diagramme fer-cémentite, on peut définir les aciers et fontes suivant la teneur en carbone.

Désignation	% de carbone
Aciers hypoeutectiques	0,02 à 0,8
Aciers entectoïdes	0,8
Aciers hypereutectiques	0,8 à 2,06
Aciers hypoeutectiques	2,06 à 4,3
Fontes eutectiques	4,3
Fontes hypereutectiques	4,3 à 6,67

### 4.3.2. Définitions des constituants micrographiques

#### 4.3.2.1. Le carbone

C'est un élément polymorphe. Dans les conditions ordinaires, il se trouve sous la forme d'une variété de graphite, mais il peut exister également sous la forme d'une variété métastable de diamant. Le carbone est soluble dans le fer à l'état liquide et solide, mais peut aussi former une combinaison chimique, la cémentite  $Fe_3C$ .

#### 4.3.2.2. La ferrite (F)

C'est une solution solide de carbone dans le fer  $\alpha$ , c'est à dire la ferrite est constituée par du fer  $\alpha$  renfermant des traces de carbone (faible teneur en carbone, inférieure à 0,02 %), ainsi que d'autres inclusions.

On distingue la ferrite  $\alpha$  à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à 0,02 % et la ferrite  $\delta$  à haute température et à solubilité limite en carbone allant jusqu'à 0,1 %. La ferrite est peu tendre et très ductile ( $HV = 90$ ,  $Rm = 300 \text{ N/mm}^2$ ,  $K = 300 \text{ J/cm}^2$ ), Elle est magnétique à ta température ordinaire, au microscope ta ferrite a l'aspect de grains homogènes polyédriques. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'à  $760^\circ\text{C}$ .

#### 4.3.2.3. L'austénite (A)

C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer  $\gamma$ , La solubilité limite du carbone dans le fer  $\gamma$  est de 2,14 %. L'austénite est stable à haute température, elle est peu dure est relativement malléable ( $HB = 300$ ). La microstructure de l'austénite est composée de gains polyédriques . Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est anti-ferromagnétique.

#### 4.3.2.4. La cémentite (C)

La cémentite ou carbone de fer ( $Fe_3C$ ) est une combinaison chimique de fer et de carbone dont la teneur en carbone peut atteindre 6,67 %. Elle est magnétique jusqu'à  $210^\circ\text{C}$  et très dure ( $HB = 700$ ) mais fragile. La microstructure de la cémentite peut se présenter dans les aciers sous les formes suivantes :



- Lamellaire dans la perlite lamellaire.
- Grains dans les aciers avant subit un traitement thermique de recuit.
- Précipites inter-granulaires dans les aciers ayant un pourcentage de carbone supérieur à 0,8 %.

Selon le diagramme Fe-Fe<sub>3</sub>C et lors du refroidissement, la cémentite peut exister sous trois différentes formes de liaisons mais avec la même composition chimique.

Désignation	Obtention par :
Cémentite primaire	Cristallisation primaire du métal liquide suivant la ligne CD
Cémentite secondaire	Ségrégation à partir de l'austénite suivant la ligne ES
Cémentite tertiaire	Ségrégation à partir de la ferrite suivant la ligne PQ

#### 4.3.2.5. la perlite (P)

C'est un eutectoïde formé d'un mélange de grains de cémentite, sphéroïdaux noyés dans la ferrite globulaire en couches alternées (88 % de ferrite et 12 % de cémentite). Elle est obtenue lors du refroidissement et par décomposition de l'austénite à 0,8 % de carbone.

Elle présente dans l'acier ordinaire toujours une teneur en carbone de 0,85 %. La perlite est dure (HV = 200) et assez ductile  $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$ ,  $A = 10^{40}$ .

#### 4.3.2.6. La troostite (T)

C'est une perlite extrêmement fine obtenue pour des vitesses de refroidissement assez importantes (huile). Les nodules de troostite qui se développent à partir des joints de grains sont constitués par des lamelles de ferrite-cémentite non séparables en microscopie optique. Cette microstructure est caractérisée d'une trempe douce. Les caractéristiques mécaniques de la troostite sont assez importantes (HV  $\approx$  450).

#### 4.3.2.7. La bainite (B)

Ce constituant qui présente une morphologie aciculaire est obtenu après des vitesses de refroidissement élevées. On distingue des bainites supérieures qui peuvent être considérées comme étant des plaquettes de ferrite contenant des carbures apparaissant parallèlement à l'axe de la plaquette, et des bainites inférieures qui s'assimilent à des plaquettes de ferrite contenant une fine précipitation de carbures dispersés dans la plaquette de ferrite. Ces carbures ne sont discernables qu'en microscopie électronique.

Les caractéristiques mécaniques associées à une texture bainitique approchent celles d'une structure martensitique.

#### 4.3.2.8. La sorbite (S)

Ce constituant n'est plus un produit de décomposition directe de l'austénite puisqu'il correspond, en fait, à un stade de décomposition de la martensite pour des températures supérieures à environ 400°C. C'est un mélange complexe de carbure finement réparti dans

une matrice ferritique distordue. Elle conduit à des propriétés mécaniques intéressantes. Par exemple la dureté reste encore élevée ( $HV \approx 300$  à  $400$ ) pour une bonne résilience.

#### 4.3.2.9. La martensite $\alpha'$ (M)

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est la caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température de l'austénitisation, et elle coexiste souvent avec la bainite et la troostite. La martensite possède une grande dureté ( $HV = 700$  à  $900$ ), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite.

La martensite peut se présenter sous différentes morphologies : massive ou aciculaire. Cette dernière forme est de loin la plus répandue dans le cas des aciers faiblement alliés.

Toutes ces microtextures ou microstructures sont toutes des produits de décomposition de l'austénite. Elles sont composées d'un mélange de ferrite  $\alpha$  et de carbure (cémentite ou carbure plus ou moins complexes). La morphologie des deux phases en présence dépendent essentiellement de la vitesse de refroidissement.

#### 4.3.2.10. Le lédéburite I ( $L_I$ )

C'est un mélange eutectique entre l'austénite et la cémentite et provenant lors du refroidissement du métal liquide avec 4,3 % de carbone à la température eutectique.

Le lédéburite I contient 51,4 % d'austénite et 48,6 % de cémentite et peut contenir 2,06 à 6,67 % de carbone. Son domaine de stabilité est  $723^\circ\text{C}$  à  $1147^\circ\text{C}$ .

#### 4.3.2.11. Le lédéburite II ( $L_{II}$ )

Le lédéburite II provient durant le refroidissement du lédéburite I par décomposition eutectoïdale du composant contenant 51,4 % d'austénite en perlite à la température de  $723^\circ\text{C}$ . Le lédéburite II contient 51,4 % de perlite et 48,6 % de cémentite.

Durant la solidification des alliages de fer et de carbone, il y a lieu trois types de transformations isothermiques, il s'agit des réactions péritectiques, eutectiques et eutectoïdes.

#### **Remarques :**

Les traitements et les textures que nous venons de passer en revue ne sont pas uniquement applicables à des aciers faiblement alliés, ils sont directement transposables à tous les alliages métalliques possédant un diagramme similaire (exemple fer-Cu, Ti-CU, certains laitons, certains bronzes d'aluminium, etc.).

Toutefois, les caractéristiques mécaniques peuvent être différentes d'un alliage à l'autre. Dans le tableau suivant, est exposée à titre de comparaison, la dureté des différents constituants des aciers.

Constituant pur	HB	HV	HRC	Rm en kgf/mm <sup>2</sup>
Ferrite non alliée	≈ 45			≈ 24
Ferrite écrouie	50 à 80			
Perlite lamellaire	200 à 250	215 à 265	≈ 20	≈ 75
Perlite grenue	160 à 170	≈ 175		≈ 60
Austénite	230 à 280	235 à 285	20 à 25	≈ 85
Sorbite	250 à 300	260 à 310	25 à 30	≈ 90
Troostite	400 à 450	425 à 480	45 à 50	≈ 150
Martensite	650 à 750	750 à 900	60 à 65	250
Cémentite	600 à 650			≈ 225
Lédéburite	360 à 375			≈ 130

Ferrite alliée : dureté après avoir ajouté successivement 1 % en poids des éléments suivants							
Elément	Cr	Mo	Cu	Ni (V)	W	Mn	Ti
Dureté HV	74	80 à 85	80 à 88	80 à 94	80 à 98	≈ 90	≈ 105

Sur les figures 121 et 122, sont représentés les divers constituants micrographiques des aciers et des fontes :

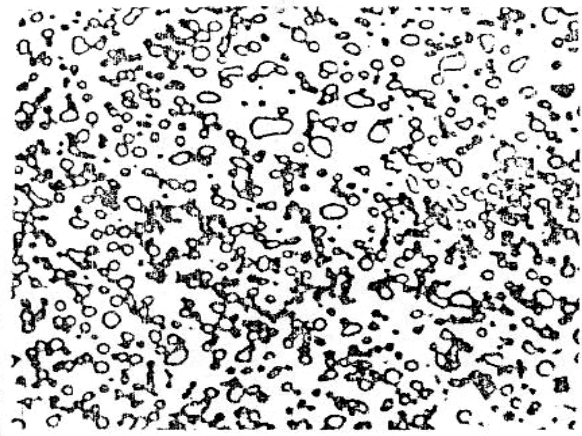


FERRITE (Gr.=150) (attaque acide picrique)

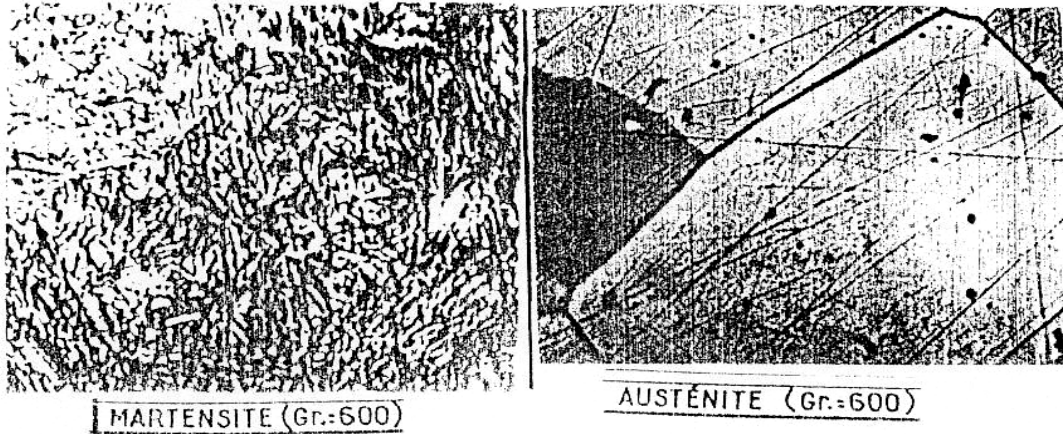
CÉMENTITE



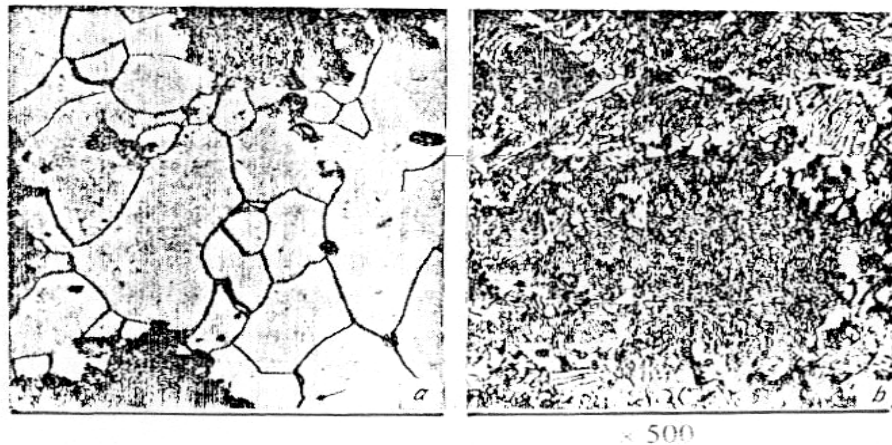
PERLITE LAMELLAIRE (Gr.=600)



PERLITE GLOBULAIRE (Gr.=900)



( fig.121 )

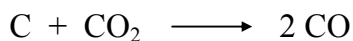


microstructure de la fonte malléable  
 (a) : fonte ferritique (b) : fonte perlitique  
 (fig. 122)

#### 4.4. Malléabilisation par décarburation (fonte malléable à cour blanc)

Si dans le cas de la malléabilisation par graphitisation, on procède par un traitement thermique dans ce cas de malléabilisation par décarburation, on procède par un traitement mixte thermochimique. Il consiste à chauffer la fonte à 960°C durant 50 à 100 heures dans un milieu oxydant constitué de minerai de fer de manière à éliminer le carbone de la fonte sous forme de gaz. L'oxydation du carbone se déroule comme suit :

- L'oxygène ambiant de la caisse réagit avec le carbone de la surface des pièces en donnant les gaz CO et CO<sub>2</sub>
- L'oxyde de carbone réagit avec le minerai de fer en donnant du CO<sub>2</sub>.
- Le gaz CO<sub>2</sub> formé agit sur le carbone de la fonte suivant la réaction :

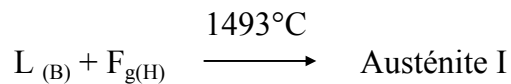


Ainsi, l'oxydation porte sur le carbone de l'austénite de la surface de la pièce et le carbone diffuse du centre vers la périphérie pour remplacer la carbone oxydé et la cémentite entre en solution.

## 4.5. Les transformations

### 4.5.1. Transformation péritectique

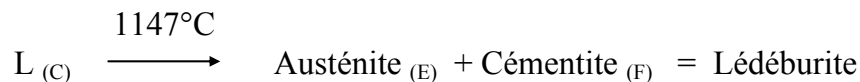
Durant le refroidissement des alliages titrant de 0,1 à 0,51 % de carbone, se précipite la ferrite  $\delta$  ( $F_\delta$ ) suivant la ligné AB. A la température de 1493°C, il y a interaction péritectique des cristaux  $\delta$  (0,1 % C) avec le reste du liquide de composition B (0,51 % C), ( $L_B$ ), en formant l'austénite de composition I ( 0,16 % C) selon la réaction péritectique :



### 4.5.2. Transformation eutectique

Les alliages liquides titrant de 2,06 à 6,67 % C se solidifient suivant la ligne BC en donnant de l'austénite primaire suivant la ligne CD en donnant la cémentite primaire.

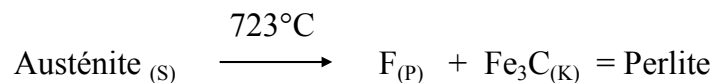
A la température eutectique de 1147°C, se décompose le liquide eutectique restant (4,3%C) en austénite (2,06 % C) et cémentite (6,67 % C) selon la réaction eutectique :



Le mélange formé d'austénite (E) et de cémentite (F) est appelé lédéburite selon le nom du métallurgiste allemand Ledebur.

### 4.5.3. Transformation eutectoïde

A la température eutectoïde de 723°C se décompose l'austénite eutectoïde titrant 0,8%C en formant la ferrite avec 0,02 % C ( $F_p$ ) et la cémentite secondaire avec 6,67 % C ( $Fe_3C_{(K)}$ ) suivant la réaction eutectoïde :



Le mélange constitué de ferrite  $F_p$  et de cémentite  $Fe_3C_{(K)}$  s'appelle perlite.

## 4.6. Solidification et transformation des aciers et fontes

La partie qui sera consacrée à l'étude de la solidification et transformation des différents alliages de fer et de carbone (fontes et aciers) pouvant exister selon le diagramme Fe-  $Fe_3C$  comme le montre la figure 108, les aciers et fontes suivantes :

- Aciers hypoeutectoïdes.
- Aciers eutectoïdes.
- Aciers hypereutectoïdes.
- Fontes hypoeutectiques.
- Fontes eutectoïdes.
- Fontes hypereutectiques.

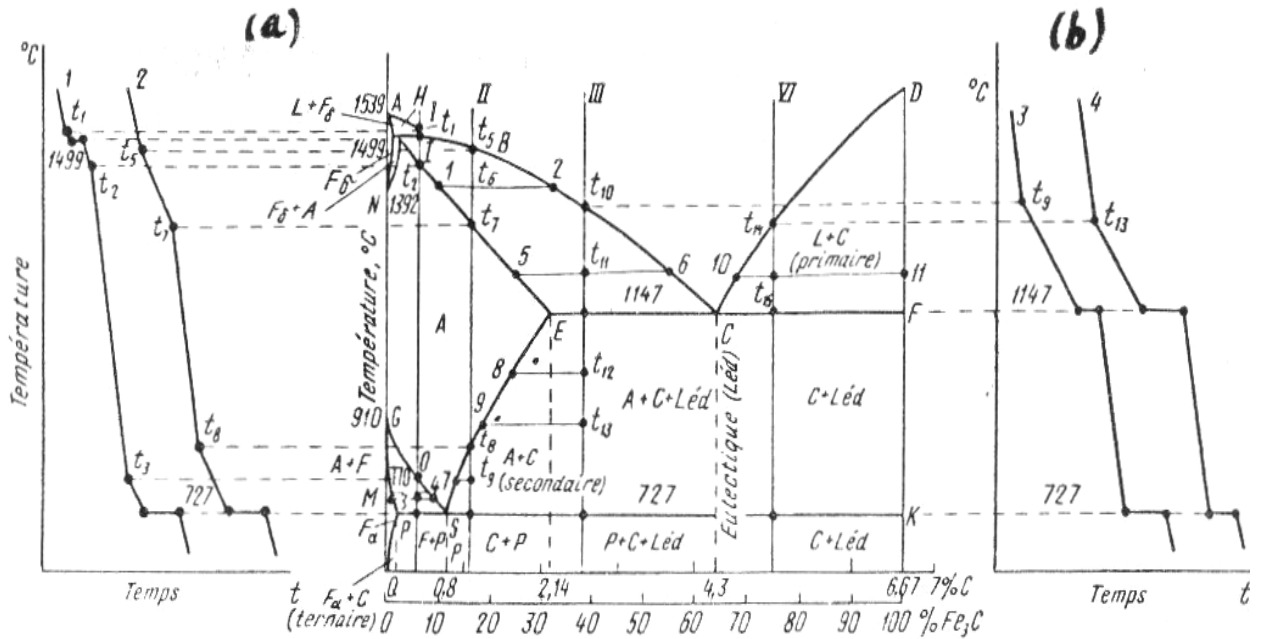


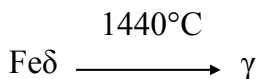
Diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C et courbes de refroidissement de l'acier (a) et de la fonte (b)

(fig. 108)

#### 4.6.1. Aciers hypoeutectiques

##### Aciers à 0,05 % C :

Lorsque la ligne liquidus AB est atteinte, il y a précipitation des cristaux primaires Fe $\delta$  dans l'alliage liquide. Après dépassement de la ligne solidus AH (T=1510°C), la totalité de l'alliage est solidifiée et se compose de la terme Fe $\delta$ . A la température 1440°C (ligne NH), commence la transformation de la ferrite Fe $\delta$  en austénite ( $\gamma$ ) pauvre en carbone et selon la réaction :



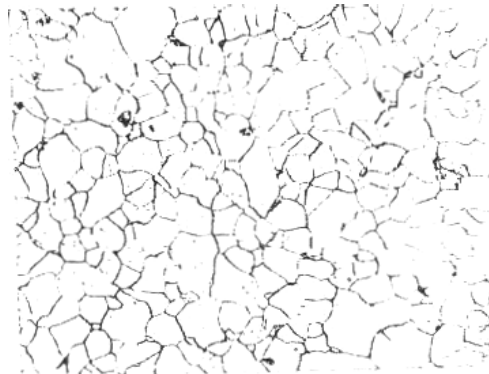
Et se termine à la température de 1120°C où l'acier se compose uniquement des cristaux d'austénite ( $\gamma$ ). Lorsque la ligne GOS est atteinte (T=900°C), il y a précipitation de la ferrite  $\alpha$  à partir de l'austénite et le reste de l'austénite s'enrichit en carbone.

A la température T = 723°C, les cristaux d'austénite contenant 0,80 % de carbone, se décomposent en donnant la perlite suivant la réaction eutectoïde, mais en faible quantité.

A la température T = 769°C, la ferrite Fe $\alpha$  précipitée passe de l'état paramagnétique à l'état ferromagnétique. Si on poursuit le refroidissement au dessous de 723°C, la solubilité du carbone dans Fe $\alpha$  diminue. Le carbone précipité se dépose sous forme de cémentite (cémentite tertiaire), dans les joints de grains de la ferrite Fe $\alpha$ .

La figure 109 montre la structure de l'acier à 0,05 % C et à la température ambiante (agrandissement x 100). A coté des cristaux de ferrite clairs, on peut distinguer les taches

sombres dans les joints de grains de  $Fe\alpha$ , représentant la perlite et à l'intérieur des grains de  $Fe\alpha$ , les taches sombres représentant la scorie restant dans l'acier.



V = 100 : 1  
Fe + 0,05 % C (Acier doux).  
**(fig. 109)**

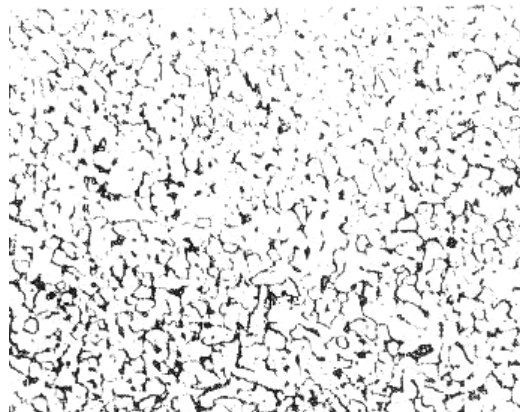
### Aciers à 0,15 % C :

A la température de 1525°C se précipitent les cristaux de ferrite  $\delta$  à partir de l'alliage liquide et à la température de 1493°C, il y a transformation péritectique d'une partie de la ferrite  $Fe\delta$  en austénite. Avec l'abaissement de la température, tout le reste de la ferrite  $Fe\delta$  se transforme en austénite.

A la température  $T = 1475^\circ\text{C}$ , et lorsque le ligne IN est atteinte, l'acier se compose uniquement de l'austénite à 0,15 % C.

A  $T = 860^\circ\text{C}$ , et lorsque la ligne GOS est atteinte, il y a précipitation de la ferrite  $\alpha$ , pauvre en carbone, à partir de l'austénite, le reste de l'austénite s'enrichit en carbone avec la diminution de la température où le % C est de 0,8 % à  $T=723^\circ\text{C}$ , à cette température, il y a lieu la transformation eutectoïde par décomposition de l'austénite en perlite.

La structure de l'acier à 0,15 % C, (fig.110), est constituée de ferrite (clair) et de perlite (parties sombres).

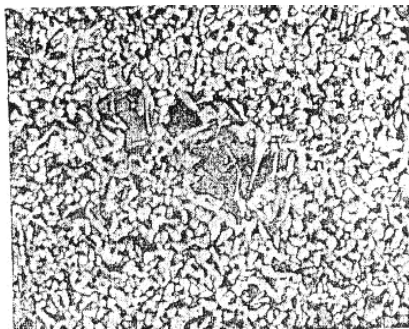


V = 100 : 1  
Fe + 0,15 % C (Acier cémenté).  
**(fig. 110)**

### Aciers à 0,25 % C :

A la température  $T = 1520^{\circ}\text{C}$ , se précipitent les cristaux primaires de ferrite  $\delta$  et rapidement à la température péritectique  $T = 1493^{\circ}\text{C}$ , il y a transformation de la ferrite  $\delta$  en austénite. Avec la diminution de la température, le reste du liquide se solidifie suivant la ligne IE du solidus en formant de l'austénite.

A  $T = 1475^{\circ}\text{C}$ , tout le liquide est solidifié et se compose uniquement de l'austénite à 0,25 % C. La précipitation de la ferrite  $\alpha$ , pauvre en carbone, commence lorsque la température aura atteint la ligne GOS (une cristallisation secondaire), l'austénite s'enrichit en carbone jusqu'à 0,8 % C, point eutectoïde où  $T=723^{\circ}\text{C}$  l'austénite à 0,8 % C, se décompose en perlite. La structure de ce type d'acier se compose de la perlite et de la ferrite (fig. 111).

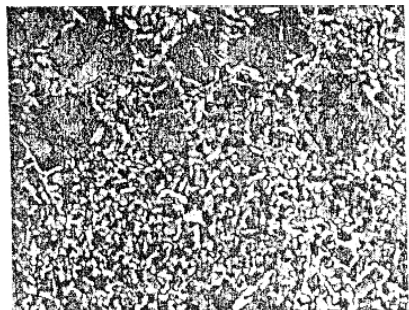


V = 100 : 1  
Fe + 0,25 % C (Acier de construction).  
**(fig. 111)**

### Aciers à 0,40 % C :

Lors de la solidification et avec l'abaissement de la température, se précipitent les cristaux de ferrite  $\delta$ , ensuite l'austénite (transformation péritectique). La cristallisation se termine à  $T = 1450^{\circ}\text{C}$  de la ligne IE et l'alliage se compose uniquement de l'austénite.

Une cristallisation secondaire débute à la ligne GOS avec précipitation de la ferrite  $\alpha$  et se termine par la décomposition eutectoïde de l'austénite 0,8 % C en perlite à  $T = 723^{\circ}\text{C}$ . La structure de cet acier est représentée par la figure 112 où l'on distingue bien les deux composants ferrite et perlite.

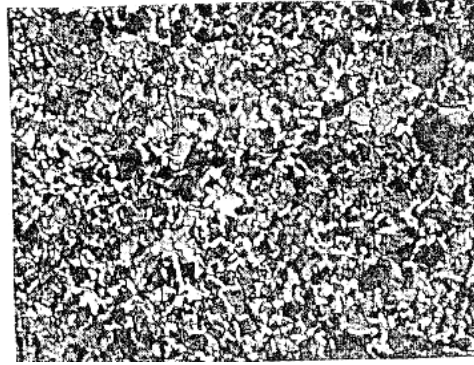


V = 100 : 1  
Fe + 0,40 % C (Acier à traitement thermique : revenu).  
**(fig. 112)**



### Aciers à 0,60 % C :

Entre 1490°C et 1410°C, se précipite l'austénite primaire. La cristallisation secondaire se déroule de la même façon que celle de l'acier à 0,40 % C, seulement la portion de la perlite augmente par rapport à celle de la ferrite. La structure métallographique de ce type d'acier se compose de la ferrite et de la perlite (fig.113).



V = 100 : 1

Fe + 0,60 % C (Acier à traitement thermique ou acier à outils).

(fig. 113)

### 4.6.2. Aciers eutectoïdes

#### Aciers à 0,80 % C :

La cristallisation primaire de cet acier s'effectue comme celle de l'acier à 0,60% C et la cristallisation secondaire s'effectue sans transformation de la ferrite, à partir de l'austénite, il y a transformation eutectoïde directe de l'austénite en perlite. Les points  $A_3$  et  $A_1$ , coïncident et la courbe de refroidissement ne porte pas de point de flexion  $A_{r3}$  a ou de palier  $A_{r1}$ . La figure 114, montre la structure métallographique (perlite pure) de l'acier eutectoïde.



V = 100 : 1

Fe + 0,80 % C (Acier pour outils).

(fig. 114)

Selon le diagramme Fer-carbone, l'alliage eutectoïde se décompose en deux constituants, à savoir la ferrite et la cémentite. A la température  $T = 723^\circ\text{C}$  et avec un

refroidissement lent, se forme de la perlite lamellaire à cause de la présence d'une grande quantité de ferrite (88%) et d'une faible quantité de cémentite (12%) dans l'alliage.

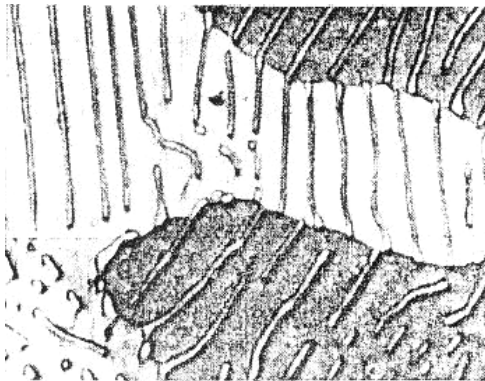
Les figures 115, 116, 117, et 118 montrent la structure fine et épaisse de l'eutectoïde perlite obtenue par différents grossissements.



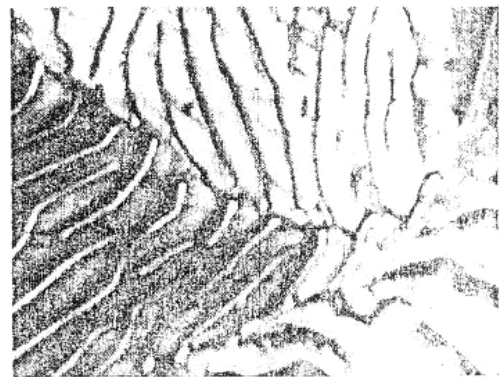
V = 500 : 1  
Perlite lamellaire fine.  
**(fig. 115)**



V = 500 : 1  
Perlite lamellaire épaisse.  
**(fig. 116)**



V = 1000 : 1  
Perlite lamellaire épaisse.  
La ferrite est fort attaquée.  
**(fig. 117)**

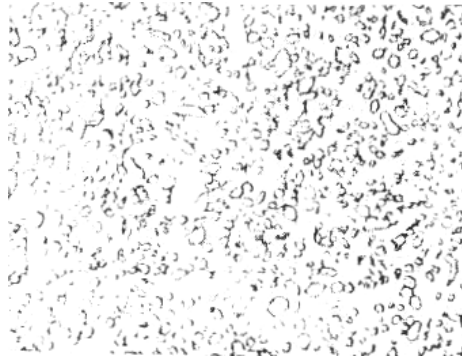


V = 2000 : 1  
Perlite lamellaire épaisse.  
La ferrite est plus attaquée.  
**(fig. 118)**

On peut modifier la forme de la cémentite lamellaire soit par l'intermédiaire d'un refroidissement extra long, dans le domaine de l'austénite, ou par trempe de plusieurs heures de la perlite lamellaire à la température  $T = 700^{\circ}\text{C}$ .

Sous l'influence de la tension superficielle, les particules lamellaires de la cémentite se divisent en petites particules ayant la forme globulaire.

La figure 119 montre la structure d'un acier à 0,90 % C, lequel a été trempé durant 10 heures à  $T = 700^{\circ}\text{C}$ , on peut constater la transformation de la cémentite lamellaire en cémentite globulaire, ce qui donne une perlite globulaire

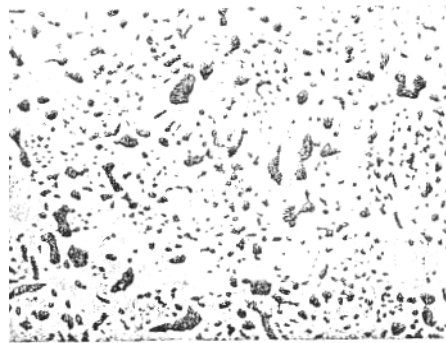


V = 500 : 1

Perlite globulaire. La cémentite de la perlite.  
Les sphères formées par la cémentite de la perlite ne sont pas réguliers.  
(attaque avec HNO<sub>3</sub> à 1%).

**(fig. 119)**

Et enfin la figure 120 montre la structure du même acier avec une perlite globulaire, où la cémentite est sombre et la ferrite est claire Le procédé utilisé pour l'obtention de la perlite globulaire est appelé trempe d'adoucissement, car la perlite globulaire possède une dureté faible par rapport à la perlite lamellaire.



V = 500 : 1

Perlite globulaire. Les grains noirs représentent la cémentite  
(attaque NaOH chaud)

**(fig. 120)**

### 4.6.3 Aciers hypereutectoïdes

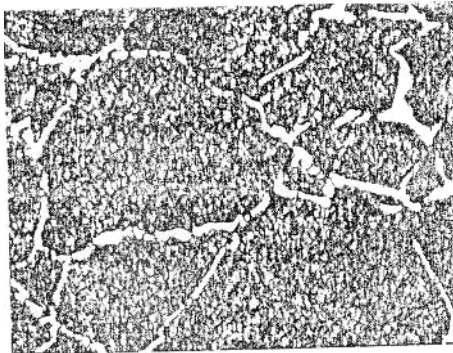
#### Aciers à 1,15 % C :

L'alliage liquide se solidifie par la précipitation de l'austénite, à la fin de la solidification et dans le domaine de température entre 850°C et 1320°C, l'acier se compose uniquement de l'austénite.

Avec la diminution de la température et lorsque la solubilité de l'austénite par le carbone, ligne SE est atteinte, le carbone en excès se précipite sous forme de cémentite secondaire dans les joints de grains de l'austénite. Plus la température diminue, plus la quantité de cémentite secondaire cristallisée est importante, ce qui rend les couches de la

cémentite plus épaisses, mais à la température  $T = 723^{\circ}\text{C}$ , l'austénite contenant 0,80 %C se décompose en perlite.

Les figures 121 et 122 montrent la structure d'un acier hypereutectoïdes à 1,15% C. La figure 121 est obtenue par l'attaque à l'acide nitrique à 1%, qui donne une couleur sombre jusqu'à noire de la perlite, la cémentite n'est pas attaquée et reste claire. Tandis que la figure 122, elle est obtenue par l'attaque à l'aide d'une base (solution de sodium) où la cémentite est sombre et la perlite est claire.

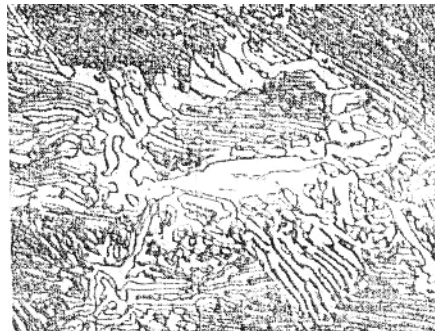


V = 500 : 1  
Fe + 1,15 % C (acier à outils)  
Perlite sombre, cémentite secondaire claire  
**(fig. 121)**



V = 500 : 1  
Fe + 1,15 % C (acier à outils)  
Cémentite sombre, perlite claire  
**(fig. 122)**

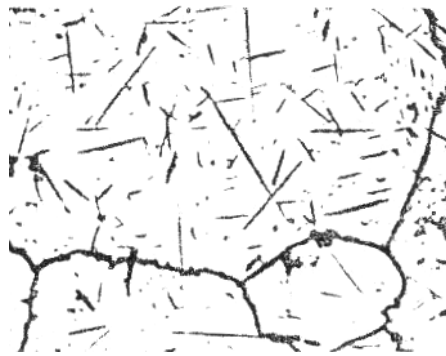
Plus la teneur en carbone dans l'acier est élevée, plus les couches de la cémentite deviennent épaisses. La figure 123 montre la structure d'un acier avec 1,61 % C.



V = 500 : 1  
Fe + 1,61 % C  
Perlite avec bandes larges de cémentite secondaire sur les joints  
**(fig. 123)**

La perlite de la cémentite secondaire dans les joints des grains de l'austénite s'effectue seulement lorsque le refroidissement est lent, dans le cas contraire, le carbone n'aura pas suffisamment de temps pour sortir de l'intérieur de l'austénite et se précipite dans les joints des grains de l'austénite.

Donc le résultat, c'est que la cémentite secondaire se précipite partiellement ou totalement, à l'intérieur de l'austénite sous formes d'aiguilles comme le montre la figure 124.



V= 500 : 1  
Fe + 1,31 % C

La cémentite sous forme d'aiguilles se trouve partiellement sur les joints de grains à l'intérieur des cristaux d'austénite primaire.

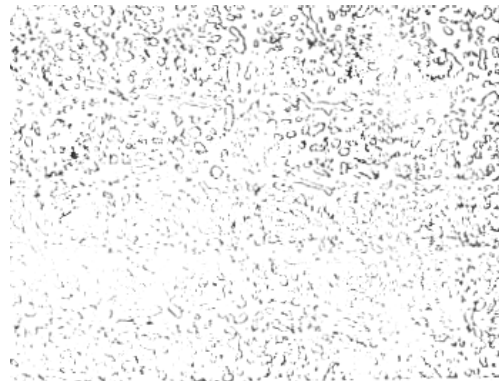
**(fig. 124)**

Une telle structure n'est pas souhaitée à cause de sa fragilité. Si on veut obtenir un acier avec une structure globulaire fine et homogène, l'acier doit subir en premier un refroidissement relativement rapide au dessus de la ligne SE, ce qui donne un état perlitique fin, ensuite un traitement d'adoucissement. Les figures 125 et 126 représentent, respectivement, la structure des aciers avec 1,50 % C et 1,30 % C.



V = 500 : 1  
Fe + 1,50 % C  
Perlite + des halos de ferrite  
entourant la cémentite secondaire

**(fig. 125)**



V = 500 : 1  
Fe + 1,50 % C  
Cémentite globulaire  
(recuit d'adoucissement)

**(fig. 126)**

Si la teneur du carbone augmente jusqu'à 2,06 % C, il y a précipitation d'un nouveau composant structurel l'eutecticum lédéburite. Dans ce cas, les alliages ne sont plus forgeables et portent le nom de fontes blanches.

#### 4.6.4. Fontes hypoeutectiques

##### Fontes à 2,15% C :

A partir de l'alliage liquide et à la température de 1380°C se précipite l'austénite primaire, pauvre en carbone, le reste du liquide s'enrichit en carbone.

A la température  $T = 1147^{\circ}\text{C}$ , l'austénite contenant 2,06 % C (point E) et le reste du métal contenant 4,3 % C (point C), se solidifient eutectiquement en formant le lédéburite.

Avec l'abaissement de la température et, lors du refroidissement, se reproduisent des transformations dans l'alliage, à partir de l'austénite primaire se trouvant dans le lédéburite, se précipite la cémentite secondaire ( $\text{Cm}_{\text{II}}$ ), jusqu'à la température  $T = 723^{\circ}\text{C}$ , l'austénite à 0,8 % se transforme en perlite (eutectoïde).

A la température ambiante, la structure d'une telle fonte se compose de l'austénite primaire dissoute dans la perlite du lédéburite et de la cémentite secondaire dans les joints de grains, (fig. 127).



V = 500 : 1

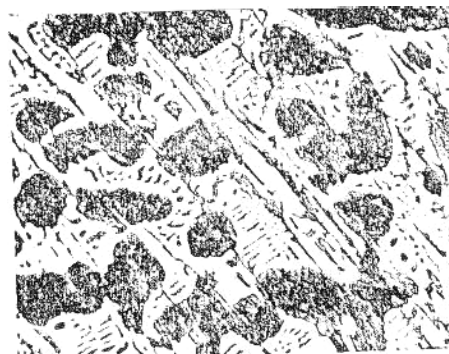
Perlite + lédéburite + cémentite secondaire dans les joints de grains.

(fig. 127)

### Fontes à 2,5 % C :

Lors du refroidissement et à partir de la température  $T = 1350^{\circ}\text{C}$ , se précipite l'austénite primaire suivant la ligne BC.

Jusqu'à la température  $T = 1147^{\circ}\text{C}$ , le reste du métal liquide contient 4,3 % C (point C) et se transforme eutectiquement en lédéburite, si on poursuit le refroidissement, se précipite la cémentite secondaire à partir de l'austénite jusqu'à  $T = 723^{\circ}\text{C}$ . L'austénite décarburee jusqu'à 0,8 % C se transforme en perlite. A la température ambiante, la structure d'une telle fonte se compose de la perlite, de l'austénite dendritique et du lédéburite, (fig. 128).



V = 100 : 1

Fe + 2,5 % C

Perlite + cristaux mixtes  $\gamma$  (sombre) dans la perlite + lédéburite

(fig. 128)

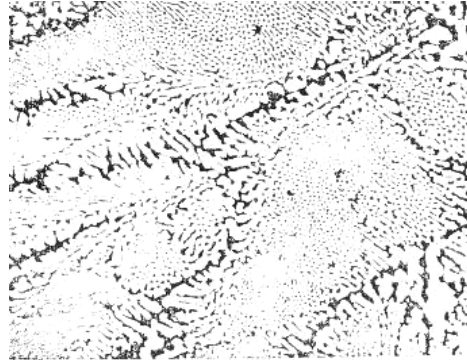
#### 4.6.5. Fontes eutectiques

##### Fontes à 3,4 % C :

L'alliage liquide à 4,3 % C se solidifie sans précipitation primaire et donne directement à  $T = 1147^{\circ}\text{C}$  (point C), l'eutectique le lédéburite. La structure caractéristique du lédéburite est représentée par les figures 129 et 130.



$V = 500 : 1$   
Fe + 4,3 % C  
Lédéburite : les cristaux  $\gamma$  du lédéburite ont la forme dendritique.  
**(fig. 129)**

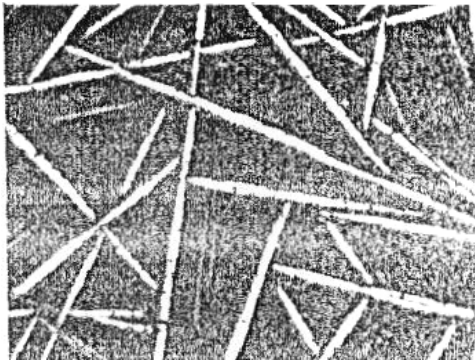


$V = 500 : 1$   
Fe + 4,3 % C  
Lédéburite : les cristaux du lédéburite ont la forme globulaire.  
**(fig. 130)**

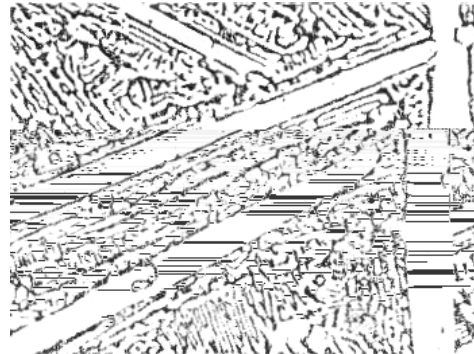
#### 4.6.6. Fontes hypereutectiques

##### Fontes à 5,5 % C :

Lors du refroidissement et lorsque le liquidus Cd est atteint, il y a précipitation de la cémentite primaire. Avec la diminution de la température, le reste du liquide devient pauvre en carbone et contient à  $T = 1147^{\circ}\text{C}$ , une teneur en carbone de 4,3 %, à cette température et concentration, il se solidifie eutectiquement en donnant du lédéburite. La structure, à la température ambiante, se compose de la cémentite primaire noyée dans le lédéburite (fig 131 et 132).



$V = 100 : 1$   
Fe + 5,5 % C  
Cristaux de cémentite primaire (aiguilles) dans le lédéburite.  
**(fig. 131)**



$V = 500 : 1$   
Fe + 5,5 % C  
**(fig. 132)**

#### 4.7. Détermination de la position des composants dans la structure

Non seulement, la quantité absolue de la ferrite et la cémentite joue un rôle important dans la détermination des propriétés de l'acier et de la fonte, mais aussi les différents constituants rentrant dans les différentes structures.

Connaissant la teneur en carbone d'un alliage, on peut facilement déterminer la quantité totale de la cémentite par la règle de trois, par exemple :

Une fonte à 2,5 % C contient  $25 / 6,67 \times 100 \% = 37,5 \%$ ,  
Et le reste  $100 \% - 37,5 \% = 62,5 \%$  de ferrite.

Il sera compliqué si on ne veut pas déterminer la quantité des phases, mais la quantité de chaque composant de la structure. Dans ce cas, l'utilisation de la loi de levier nous facilitera le calcul.

Selon le % du carbone (X % C), la ligne PS du diagramme est divisée en deux parties PX et XS, pour déterminer la portion de la ferrite et de la perlite, on utilise les deux équations :

- (1) Portion de ferrite (%) x PX = portion de perlite (%) x SX.
- (2) Portion de ferrite (%) + portion de perlite (%) = 100%.

Donc c'est un système d'équations à deux inconnues, par exemple pour déterminer la portion de la perlite on a :

$$\text{Portion de ferrite} = \frac{\text{Portion de perlite} \times \text{SX}}{\text{PX}}$$

$$\frac{\text{Perlite} \times \text{SX}}{\text{PX}} + \text{Perlite} = 100$$

$$\text{Portion de perlite} = \frac{\text{PX} \times 100}{\text{PX} + \text{SX}}$$

$$\text{Portion de ferrite} = \frac{\text{SX} \times 100}{\text{PX} + \text{SX}} = 100 - \text{portion de perlite}$$

A partir de la teneur de 0,8 % C, on utilise la ligne SK pour déterminer les leviers correspondants. Si on considère dans cette ligne un alliage à x % C, on peut déterminer selon les deux équations ci-dessous, la quantité de la perlite et de la cémentite secondaire :

- (3) Portion de la perlite % + Sx = portion de cémentite x kx.
- (4) Portion de perlite % + portion de cémentite % = 100%.

Par exemple, pour déterminer le % de cémentite secondaire, on a :

$$\text{Portion de cémentite secondaire \%} = \frac{\text{Sx} \times 100}{\text{Sx} + \text{kx}}$$



$$\text{Et la portion de perlite} = \frac{kx \times 100}{Sx + kx}$$

**Exemple 1 :**

Combien de % de cémentite et de ferrite contient l'eutectoïde perlite ?

Les leviers sont :

$$a = 0,8 \% - 0,0 = 0,8$$

$$b = 6,7 - 0,8 = 5,9$$

$$\text{Masse de cémentite} = \frac{0,8}{5,9 + 0,8} \times 100 \% = 12 \%$$

$$\text{Masse de ferrite} = 100 \% - 12 \% = 88 \%$$

**Exemple 2 :**

Combien de % contient l'eutecticum lédéburite, les composants, l'austénite et la cémentite ?

$$a = 4,3 - 2,06 = 2,24$$

$$b = 6,67 - 4,3 = 2,37$$

$$\text{Masse de cémentite} = \frac{2,24}{2,24 + 2,37} \times 100 \% = 48,6 \%$$

$$\text{Masse de l'austénite} = 100 \% - 48,6 \% = 51,4 \%$$

**Exemple 3 :**

Combien contient un acier à 0,35 % C, de ferrite et de perlite ?

$$a = 0,35 - 0,0 = 0,35$$

$$b = 0,8 - 0,35 = 0,45$$

$$\text{Masse de ferrite} = \frac{0,45}{0,45 + 0,35} \times 100 \% = 56 \%$$

$$\text{Masse de la perlite} : 100 \% - 56 \% = 44 \%$$

**Exemple 4 :**

Déterminer le % de la cémentite secondaire et de la perlite contenues dans un acier à 1,7 % C.

$$a = 1,7 - 0,8 = 0,9$$

$$b = 6,7 - 1,7 = 5$$

$$\text{Masse de la perlite} = \frac{5}{0,9 + 5} \times 100 \% = 85 \%$$

Masse de la cémentite = 100 % - 85 % = 15 %

**Exemple 5 :**

Déterminer le % de l'austénite précipité, de la cémentite secondaire et du lédéburite d'une fonte à 2,5 % C.

A la température 1147°C, on a seulement la présence de l'austénite et du lédéburite, la portion de chaque composant est :

$$a = 2,5 - 2,06 = 0,44$$

$$b = 4,3 - 2,5 = 1,8$$

$$\text{Masse de l'austénite} = \frac{1,8}{1,8 + 0,44} \times 100 \% = 80,5 \%$$

$$\text{Masse du lédéburite} = \frac{0,44}{1,8 + 0,44} \times 100 \% = 19,5 \%$$

Mais les 80,5 %, lors du refroidissement se cristallisent en donnant la cémentite secondaire et la perlite. La quantité de cémentite précipité à partir des 80,5 %, de l'austénite peut être calculée de la façon suivante :

100% d'austénite donne une quantité de 21,5 % de cémentite, comme il a été calculé dans l'exemple 4. Mais dans ce cas, on a seulement 80,5 % d'austénite, donc on aura :

$$\frac{80,5}{100} \times 21,5 = 17,3 \text{ \% de cémentite secondaire}$$

et  $80,5 - 17,3 = 63,2 \%$  d'austénite précipitée dans la perlite à la température 723°C.

Donc une fonte à 2,5 % C contient à la température ambiante, 19,5 % de lédéburite. 63,2 % d'austénite précipitée dans la perlite et 17,3 % de cémentite secondaire.

**Exemple 6 :**

Déterminer le % de cémentite primaire et de lédéburite contenus dans une fonte avec 5,0 % C.

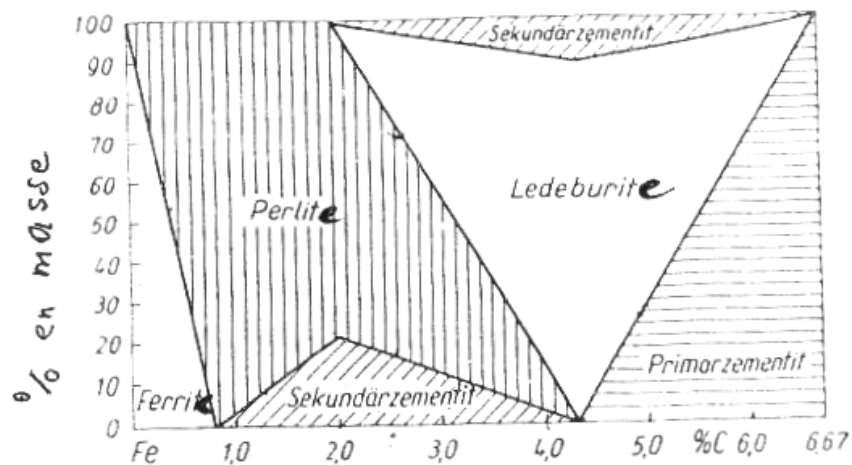
$$A = 5,0 - 4,3 = 0,7$$

$$B = 6,7 - 5,0 = 1,7$$

$$\text{Masse de lédéburite} = \frac{1,7}{1,7 + 0,7} \times 100 \% = 70,8 \%$$

Masse de la cémentite primaire = 100 % - 70,8 % = 29,2 %

Une autre méthode, plus pratique, est utilisée pour déterminer les portions de chaque composant de la structure d'un alliage, elle est représentée par le diagramme de structure ou triangle de structure (fig.133).



Triangle de structure de l'alliage Fe-C

(fig. 133)

Dans ce diagramme, les ordonnées expriment la portion en % des différents composants structurales et l'abscisse, la teneur en carbone de l'alliage. A partir d'un tel diagramme, on peut lire directement les portions en % de chaque composant.

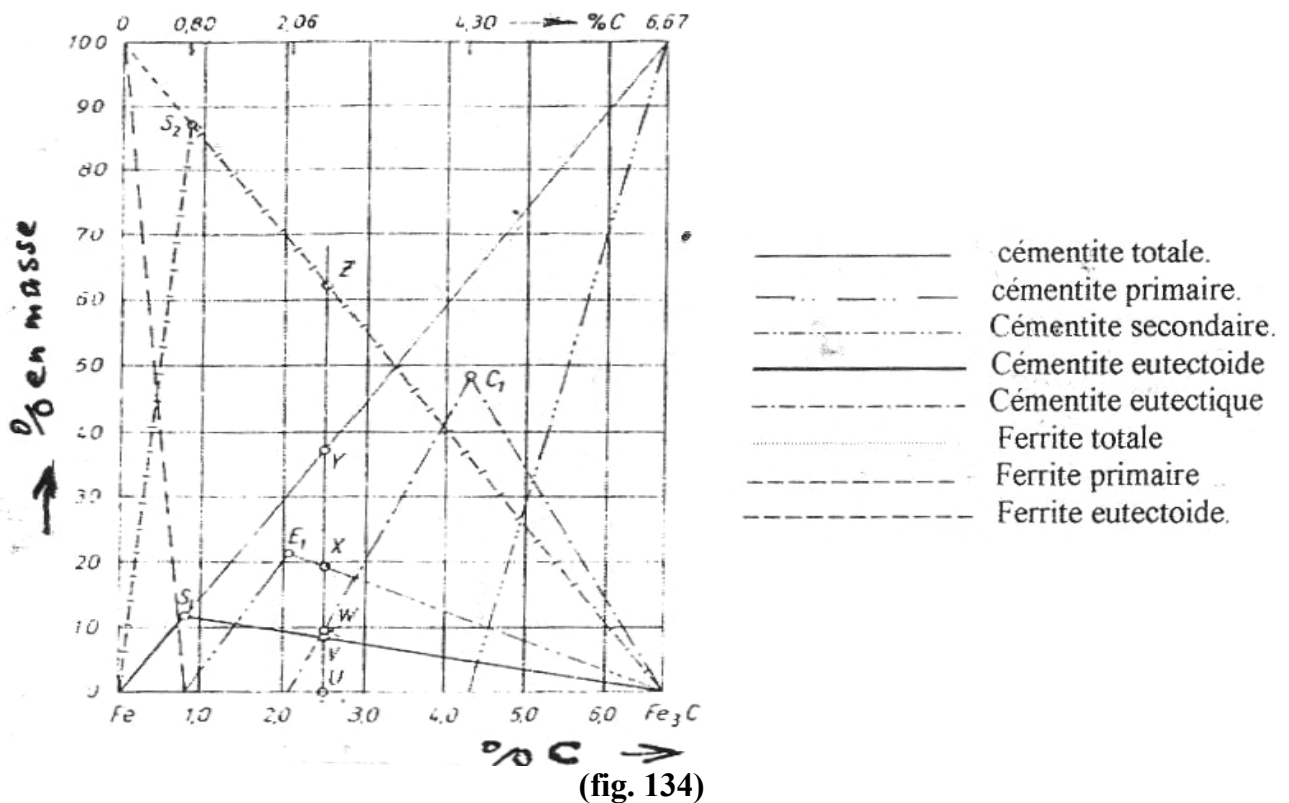
- 0 % C correspond à 100% de ferrite.
- 0,8 % C correspond à 100% de perlite.
- 4,3 % C correspond à 100% de lédéburite.
- 6,67% C correspond à 100% de cémentite primaire.

Par exemple, pour un acier à 0,6 % C, on peut lire directement : ferrite = 25 % et pour une fonte à 2,5 % C, on peut en déduire directement du diagramme 17 % de cémentite secondaire, 63 % de perlite et 20 % de lédéburite dans laquelle existe 2 % de cémentite secondaire.

Un autre diagramme très utilisé en pratique, est le diagramme de Uhlit Zsch, amélioré par Saeur, (fig.134). Dans ce diagramme, les ordonnées expriment la portion en % des différents constituants structurales et l'abscisse, la teneur en carbone (cémentite de l'alliage).

Seulement pour les points  $S_1$ ,  $S_2$ , E, et  $C_1$ , il est nécessaire d'utiliser la loi de levier afin de calculer la portion et la faire correspondre avec les points correspondant du diagramme. Par exemple, une fonte avec 2,5 % C, on trouve les portions suivantes :

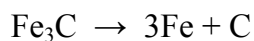
- Ligne UV = 8,5 % = la cémentite contenue dans la perlite eutectoïde.
- Ligne UW = 9,5 % = cémentite contenue dans le lédéburite eutectique.
- Ligne UX = 19 % = cémentite secondaire à partir des cristaux mixtes  $\gamma$ .
- Ligne UN = 37 % = 8,5 + 9,5 + 19 = 37 % = cémentite totale.
- Ligne UZ = 63,0 % = ferrite contenue dans la perlite eutectoïde.



- S<sub>1</sub> = 12% cémentite eutectoïde.
- S<sub>2</sub> = 88% ferrite eutectoïde.
- E<sub>1</sub> = 21,5% cémentite secondaire.
- C<sub>1</sub> = 48,6% cémentite eutectique.

Et pour un alliage avec 4,3 % C, lequel se solidifie en eutectique pur, se compose de 4,5 % de cémentite secondaire et de 48,5 % de cémentite contenue dans le lédéburite. Donc la totalité de la cémentite sera : 4,5 + 48,5 = 53 %, et le reste, c'est à dire 47 % de ferrite eutectoïde.

Pour des teneurs élevées en carbone, la cémentite n'est pas stable et se décompose surtout pour des refroidissements très lents.



Le graphite se précipite suivant la ligne C'D' (voir diagramme Fe-C), est appelé graphite moussieux, car suite à sa faible densité relative à celle du fer, il y a ségrégation et forme à la surface du bain une masse mousseuse.

Dans la structure, il est très rare de trouver le graphite primaire. Le graphite forme avec les cristaux mixtes  $\gamma$  pour 4,25 % C à T = 1153°C, l'eutectique graphite-austénite, à cet effet, la ligne de solubilité IE des cristaux mixtes  $\gamma$ , elle n'est pas coupée par l'eutecticale à 2,06 % C, mais presque à 2,03 % C, au point E', la ligne ES est déplacée vers des teneurs en carbone plus basses, jusqu'à E'S' et la ligne PSK vers des températures plus élevées P'S'K' (738°C au lieu de 723°C).

Les alliages qui se solidifient selon le diagramme Fe-C stable (en pointillés), contiennent dans leur structure l'eutectique ferrite-graphite ou les cristaux primaires de ferrite (formés à partir de l'austénite) ou encore les cristaux de graphite emmagasinés dans l'eutectique ferrite-graphite.

Les alliages se solidifient suivant le système métastable Fe-Fe<sub>3</sub>C, peuvent être transformés en système stable Fe-C, par l'intermédiaire d'un recuit, où la décomposition de la cémentite commence à T = 500°C, mais cela peut conduire à des difficultés lors de l'utilisation des fontes à des températures élevées, car la quantité du fer et du carbone obtenue après décomposition de la cémentite occupe un volume plus important que celui occupé par la cémentite primitive.

Ce phénomène est appelé "croissance de la fonte" et il est désagréable pour les pièces en fonte travaillant en température élevée, tels que, par exemple, les segments de piston.

Mais d'un autre côté, on utilise le phénomène de décomposition de la cémentite comme moyen pur obtenir une fonte, possédant une bonne coulabilité, ductile mais fragile, qui est la fonte malléable.

#### **4.8. Diagramme d'équilibre fer-graphite**

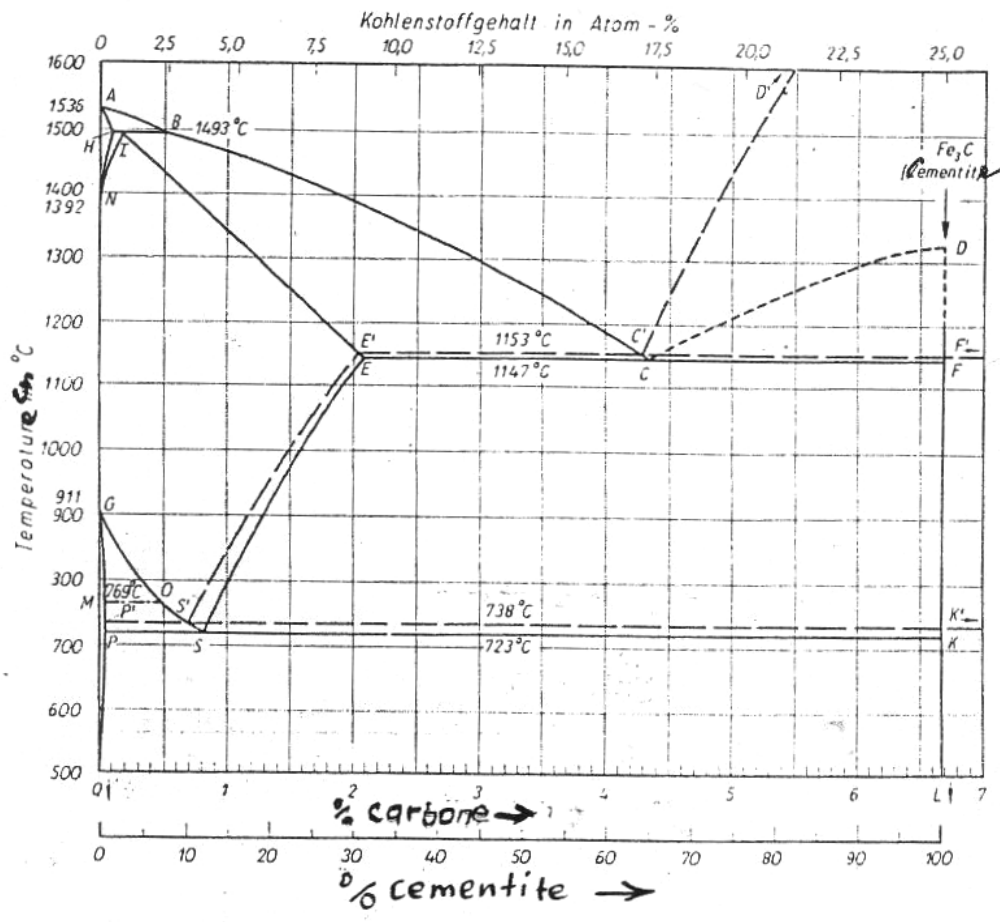
La formation d'une phase stable de graphite dans la fonte, peut se produire soit par précipitation immédiate de graphite à partir de la solution liquide (solide), soit par décomposition de la cémentite déjà formée. Le processus de formation du graphite dans la fonte s'appelle graphitisation.

Sur le diagramme représenté sur la figure 135, les traits en pointillés correspondent au diagramme Fer- graphite (système stable). Dans le système stable, le graphite primaire se cristallise suivant les températures correspondants à la ligne E'C'F' (1153°C), la ligne E'S' délimite la domaine de la précipitation du graphite secondaire et la ligne S'K' (738°C) du graphite eutectoïde.

Si lors d'une cristallisation eutectique :

- Il n'y a que le graphite qui se dégage, la fonte obtenue est dite fonte grise.
- Si la précipitation s'accompagne de cémentite, la fonte s'appelle fonte truitée.
- Si la cémentite est seule à se dégager, la fonte est dite blanche.

La probabilité de l'apparition dans la phase liquide (austénite) de la cémentite contenant 6,67% C est nettement plus grande que celle de la formation du graphite composé d'atomes de carbone. La formation du graphite à partir de la phase liquide, n'est possible qu'à très faible vitesse de refroidissement.



(fig. 135)

Lorsque le degré de surfusion n'est pas très grand, un refroidissement accéléré inhibe partiellement ou complètement la précipitation du graphite et contribue à la formation de la cémentite. La surfusion de la fonte liquide au dessous de 1147°C conduit à la formation de la cémentite.

Les inclusions tels que SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, graphite contenus dans une fonte liquide, jouent le rôle d'un support tout prêt et rendent plus facile la formation et le développement des germes de graphite.

Si lors d'une cristallisation eutectique, il n'y a que le graphite qui se dégage, la fonte s'appelle "fonte grise", si la précipitation du graphite s'accompagne de celle de la cémentite, la fonte s'appelle "fonte truitée" et enfin, s'il n'y a que la cémentite qui se dégage, la fonte s'appelle "fonte blanche".

En présence des germes de graphite déjà existants, le dépôt du graphite peut avoir lieu aux températures inférieures à 1147°C. Ce dépôt est également favorisé par l'addition de silicium qui contribue à la graphitisation. Pour accélérer la graphitisation, à partir de la phase liquide, on introduit intentionnellement dans la fonte ce qu'on appelle les inoculants qui forment les couches de cristallisation supplémentaire. Le graphite précipité par la phase liquide se développe à partir d'un seul centre et se ramifie dans toutes les directions.

Lorsque la cristallisation s'accompagne de la formation de la cémentite (primaire ou eutectique), certaines conditions sont susceptibles de déclencher sa décomposition en précipitant l'austénite et le graphite. Un refroidissement lent rend thermodynamiquement possible le dépôt de graphite à partir de l'austénite et la formation entre 727°C et 738°C du graphite eutectoïde. Dans les fontes grises, la quasi totalité du graphite se forme pendant la cristallisation à partir de la phase liquide.

La graphitisation se produit également dans une fonte dont le carbone de cémentite, qui subit un chauffage prolongé à des températures élevées. A la température inférieure à 738°C, cette graphitisation consiste en une décomposition de la cémentite en graphite et en ferrite et aux températures plus élevées en graphite et austénite.

Les éléments graphitisants sont : Si, C, Al, Cu, Ni et Zr. Ils favorisent la formation des premiers germes servant de supports de croissance pour le graphite. Parmi ces éléments, le plus important est le silicium.

#### **4.9. Influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier**

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2 % ( $\ll 2\%$ ), outre le fer et le carbone qui sont les éléments essentiels rentrant dans leur composition, les aciers se composent de plusieurs autres inclusions ou impuretés constantes ou inévitables telles que Mn, Si, P, O, N, H, etc., qui influent sur leurs propriétés. La présence de ces inclusions s'explique soit par :

- La difficulté de l'élimination de certaines d'entre elles lors de l'élaboration (S, P).
- Leurs passages dans l'acier lors de l'opération de désoxydation (Mn, Si).
- L'addition en vue d'améliorer les propriétés de l'acier (Cr, Ni, Mo, etc.)

Les fontes contiennent ces mêmes inclusions ou impuretés mais en teneurs plus grandes.

L'influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier peut être divisée en deux groupes les éléments chimiques constants et les éléments d'alliages.

##### **4.9.1. Influence des éléments chimiques constants**

La fragilité et la plasticité sont les propriétés essentielles de l'acier, le même métal peut être ductile ou fragile selon :

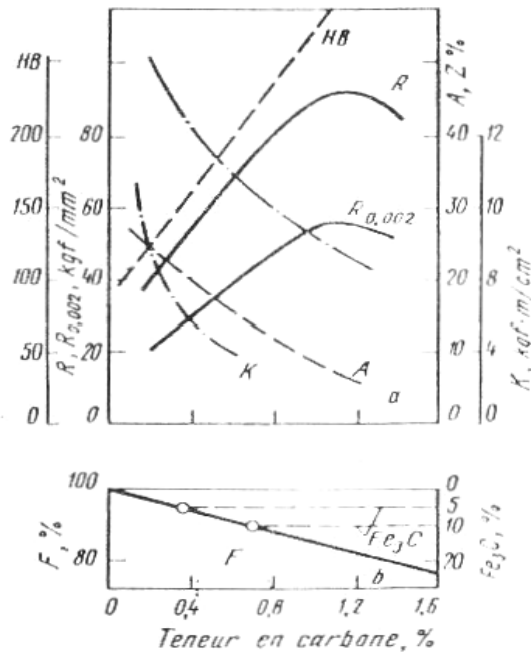
- La composition chimique.
- L'état de surface.
- La température.

Parmi les éléments chimiques, généralement contenus dans les aciers ordinaires, on peut citer : C, Si, Mn, P, S, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>.

##### **a. Le carbone :**

Après refroidissement lent, la structure d'un acier se compose de la ferrite et de la

cémentite (deux phases). La quantité de cémentite est directement proportionnelle à la teneur en carbone, (fig 136).



Influence du carbone :

- a- sur les propriétés mécaniques de l'acier,
- b- sur le nombre de phases présentes dans l'acier.

(fig. 136)

La ferrite, une fois associée à la cémentite, donne la perlite. Le carbone est un élément qui a une grande influence sur les propriétés de l'acier. L'augmentation de la teneur en carbone accroît la dureté, la charge à la rupture et la limite élastique tout en diminuant l'allongement, la striction et la résilience.

Notons toutefois que la résistance commence à chuter à partir de 1,2 % C (fig. 136). Les propriétés physiques changent aussi et on observe :

- La diminution de la densité, de la conductibilité thermique, de l'induction rémanente et de la permittivité.
- L'augmentation de la résistivité électrique et de la force coercitive.

L'influence la plus importante du carbone sur les propriétés mécaniques de l'acier est surtout due au fait que, par trempe on obtient un constituant très dur, appelé la martensite.

### b. Le silicium :

La teneur du silicium dans l'acier varie de 0,05 à 0,3 %, il existe surtout à l'état de solution ferrite. Son influence n'est pas très importante sur les propriétés de l'acier, mais rend toutefois, l'acier plus homogène à la coulée, en s'opposant, grâce à son pouvoir réducteur à la formation de soufflures, l'un des défauts les plus fréquents qu'on rencontre après solidification de l'acier. Sa présence en grande quantité permet une bonne désoxydation de l'acier.



### **c. Le manganèse :**

Le manganèse existe en solution dans la ferrite sous forme de MnS et surtout sous forme de carbure  $Mn_3C$  associé à la cémentite  $Fe_3C$ . Sa teneur dans l'acier varie de 0,2 à 0,8 %. La présence du manganèse dans l'acier est très souhaitée, car d'une part, il augmente la dureté de l'acier et sa trempabilité, et d'autre part, il joue le rôle d'antidote du soufre, car le soufre est moins nocif dans la mesure où il se trouve sous forme de MnS et non sous forme de FeS ou de soufre libre.

### **d. Le phosphore :**

Il existe en solution dans la ferrite et provoque un grossissement du grain, ce qui augmente la fragilité de l'acier à froid. En se ségréguant facilement, il contribue à l'hétérogénéité de l'acier. Sa teneur doit être limitée de 0,025 à 0,040 %. Le phosphore augmente la limite élastique et la charge de rupture tout en diminuant considérablement la plasticité et la ductilité.

### **e. Le soufre :**

C'est un élément nuisible pour l'acier, il diminue surtout sa forgeabilité. Il peut exister sous forme de MnS et de FeS. A Froid, le soufre amène également une diminution importante de la résistance. La teneur limite en soufre doit être inférieure à (0,035 à 0,060%), généralement inférieure à  $\frac{1}{4}$  de la teneur en manganèse. Parfois, on utilise des aciers de décolletage riches en soufre (0,015 à 0,025 %), afin de faciliter la fragmentation des copeaux. Un minimum de soufre (0,02 %), est toujours nécessaire pour des raisons d'usinabilité.

### **f. Influence de l'azote, de l'oxygène et de l'hydrogène :**

L'azote et l'oxygène sont contenus dans un acier sous forme d'inclusions non métalliques fragiles tels que FeO,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  (oxydes) et  $Fe_4N$  (nitrures), de solution solide ou à l'état libre dans les volumes défectueux du métal (retassures, criques, etc.). Les inclusions d'insertion (azote, oxygène), en se concentrant aux joints de grains, forment le long de ces joints, des nitrures et des oxydes, en élevant ainsi le seuil de fragilité à froid et en altérant la résistance à la rupture pour devenir fragile. Les inclusions non métalliques (oxydes, nitrures, scories), étant des concentrateurs de contraintes, sont susceptibles de réduire sensiblement, si leur quantité est importante ou s'ils s'accumulent en agrégats, la limite de fatigue et la résilience.

L'hydrogène dissout dans l'acier est un élément très nocif, qui exerce une forte action fragilisante. Absorbé pendant la fusion, l'hydrogène, non seulement rend l'acier plus fragile, mais détermine dans les laminés et les grosses pièces de forge, la formation des flocons. Les flocons sont des criques très fins et d'une forme ovale ou arrondie, qui apparaissent dans une cassure sous la forme de taches ou flocons argentés. Ils altèrent brusquement les propriétés de l'acier. Leur présence rend le métal inutilisable dans l'industrie. La fragilisation par  $H_2$  s'observe souvent, lors du soudage. L'hydrogène est alors une source de criques à froid dans le métal d'apport et de base. La coulée et la fusion sous vide, diminuent sensiblement la teneur en  $H_2$  dans l'acier.

#### 4.9.2. Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier

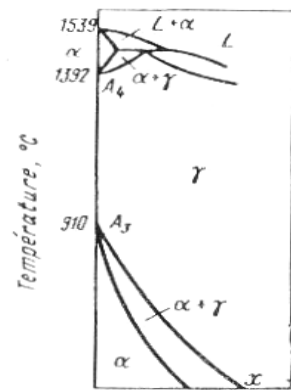
L'addition des éléments d'alliages peut donner lieu à :

- La formation des solutions solides dans le fer.
- La dissolution de ces éléments dans la cémentite, en remplaçant dans son réseau, les atomes de fer ou à la formation des carbures particuliers.
- La production (lorsque la teneur en éléments d'alliage est élevée), des composés intermétalliques avec le fer.

Les éléments d'alliages ont une influence sur les transformations allotropiques du fer. Tous ces éléments, à l'exception de C, N, H et en partie du bore, formant avec le fer des solutions solides de substitution. Leur dissolution dans le fer, influe fortement sur les positions des points  $A_4$  ( $1392^\circ\text{C}$ ) et  $A_3$  ( $910^\circ\text{C}$ ), qui déterminent le domaine des températures d'existence du fer  $\alpha$  et  $\gamma$ . L'action exercée par les éléments d'alliages sur les variétés allotropiques du fer permet de les classer en deux groupes.

##### a. Éléments gammagènes :

Comme le Ni et le Mn, ces éléments abaissent le point  $A_3$  et élèvent le point  $A_4$ , ce qui donne une extension du domaine de la phase  $\gamma$  et une réduction du domaine de la phase  $\alpha$ . La figure 137 montre l'addition de ces éléments qui fait monter le point  $A_4$  jusqu'à la ligne solidus. Alors que dans les conditions d'une concentration élevée de l'élément d'alliage, le point  $A_3$  descend jusqu'à l'ambiante empêchant ainsi la transformation réciproque  $\alpha$  en  $\gamma$  et  $\gamma$  en  $\alpha$ . Les alliages de ce type sont dit austénitiques. Les alliages qui ne subissent que partiellement la transformation  $\alpha$  en  $\gamma$ , s'appellent demi-austénitiques.

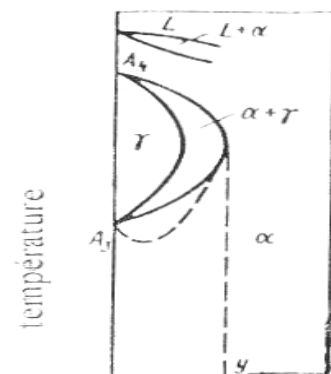


Teneur en éléments d'alliages.

(fig. 137)

##### b. Éléments alphagènes :

Ce sont les éléments tels que Cr, W, Mo, V, Al, Si, ..., ces éléments abaissent le point  $A_4$ , et élèvent le point  $A_3$ . Il en résulte que pour une concentration déterminée des éléments d'alliages, les lignes de transformation  $A_3$  et  $A_4$ , se rencontrent et le domaine de la phase  $\gamma$  se trouve complètement fermé, c'est à dire, il y a extension du domaine de la phase  $\alpha$  (ferritique) et un rétrécissement du domaine  $\gamma$  (eutenitique), (fig.138). Les alliages de ce type sont dit "ferritiques". Lorsque la transformation  $\alpha$  en  $\gamma$  ne se produit que partiellement, les alliages s'appellent demi-ferritiques.



Teneur en éléments d'alliages.

(fig. 138)

Le tableau ci-dessous nous donne un aperçu sur l'influence des principaux éléments d'alliage sur les différentes propriétés des aciers.

Eléments	Déplacement du point S (eutectide)	Déplacement des points de transformation	Formation de carbures	Affinage de grains	Augmente ( + )	Diminue ( - )
S	-	-	Non	-	Usinabilité, Fragilité à chaud	Fluidité
P	-	-	-	Non	Résistance à la corrosion, résistance à chaud, fragilité à froid	Allongement, résistance aux chocs
Si	-	↑	Non	Non	Grossissement du grain, résistance chimique d'aciers réfractaires, trempabilité, désoxydation	Solubilité du carbone, soudabilité, vitesse critique de trempe ( $V_{cr}$ )
Mn	←	↓	Oui	-	Résistance aux chocs, à l'usure, à la traction, trempabilité, désoxydation	Usinabilité, température de transformation, $V_{cr}$ de trempe
Ni	←	↓	-	Oui	Résistance à la fatigue, à la corrosion, résilience, trempabilité	Vitesse de grossissement du grain, risque de surchauffe, $V_{cr}$ de trempe
Cr	←	↑	Oui	-	Résistance à la traction, à la corrosion et à l'usure, capacité de coupe, pénétration de trempe	Déformation, $V_{cr}$ de trempe
Mo	←	↑	Oui	-	Résistance à la traction et à la fatigue, dureté, trempabilité	Allongement, forgeabilité
W	←	↑	Oui	Oui	Résistance à l'usure, dureté, capacité de coupe	

#### 4.10. Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de la fonte

La fonte liquide comporte des inclusions variées. Quelques unes sont souvent introduites intentionnellement. Outre leurs caractères alphas ou gamma-gènes et leurs actions sur la trempabilité, valables pour tous les alliages ferreux, les éléments introduits dans les fontes sont caractérisés par leurs actions :

- Graphitisantes (Si, C, Al, Cu, Ni, Zr, ...) qui se traduisent par la création de germes servant de supports de croissance pour le graphite.
- Antigraphitisantes (Cr, Mo, Mn, S, V, W, B, ...).

Nous donnons quelques indications spécifiques des principaux éléments contenus dans les fontes.

**a. Cuivre et nickel :** Eléments graphitisants qui contribuent fortement à l'affinement de la perlite par leur action gamma-gène. En outre, le cuivre est fortement antiferritisant, alors que le nickel est sans effet. L'introduction dans la fonte de ces deux éléments, entraîne une augmentation de la résistance et de la dureté.

**b. Silicium :** Élément graphitisant de base dans les fontes grises ( $\% > 3$ ), ce qui diminue la solubilité du carbone à l'état liquide dans l'eutectique et à l'état solide dans l'austénite. Il augmente la réfractarité des fontes et de leur tenue à certaines corrosions.

**c. Chrome :** Élément antigraphitisant qui stabilise les carbures en retardant leur décomposition thermique ainsi que l'oxydation interne, et de ce fait améliore la tenue au chaud.

**d. Manganèse :** Il empêche la graphitisation et renforce les liaisons atomiques entre le fer et le carbone dans la cémentite.

**e. molybdène :** Il est surtout utilisé pour son importante action sur le "nez perlitique" des courbes T.T.T, il améliore considérablement la résistance au choc thermique.

**f. Soufre :** Il est un élément nuisible qui dégrade les propriétés mécaniques de la fonte. Il abaisse la coulabilité et contribue à la formation de souillures dans les pièces moulées.