

# Introduction

Notre TP a pour but d'étudier deux types d'alliages : un alliage fer-carbone et un alliage fer-carbone-cuivre. Et pour être plus précis, un acier et un acier faiblement allié, car la teneur en carbone est inférieure à 2% en masse.

Nous allons réaliser différents cycles de traitement thermique sur des pastilles obtenues par pressage uniaxial à froid ; ainsi nous pourrons déterminer le taux de densification et observer la surface des échantillons au microscope optique.

# Partie 1 : Bibliographie et principes

## I – Matières premières

### I.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.

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. Ces dernières sont caractérisées par plusieurs points d'arrêt (point critique ou palier) correspondant à des températures définies pour des transformations déterminées.

### I.2 Etude du diagramme de phase Fe-C

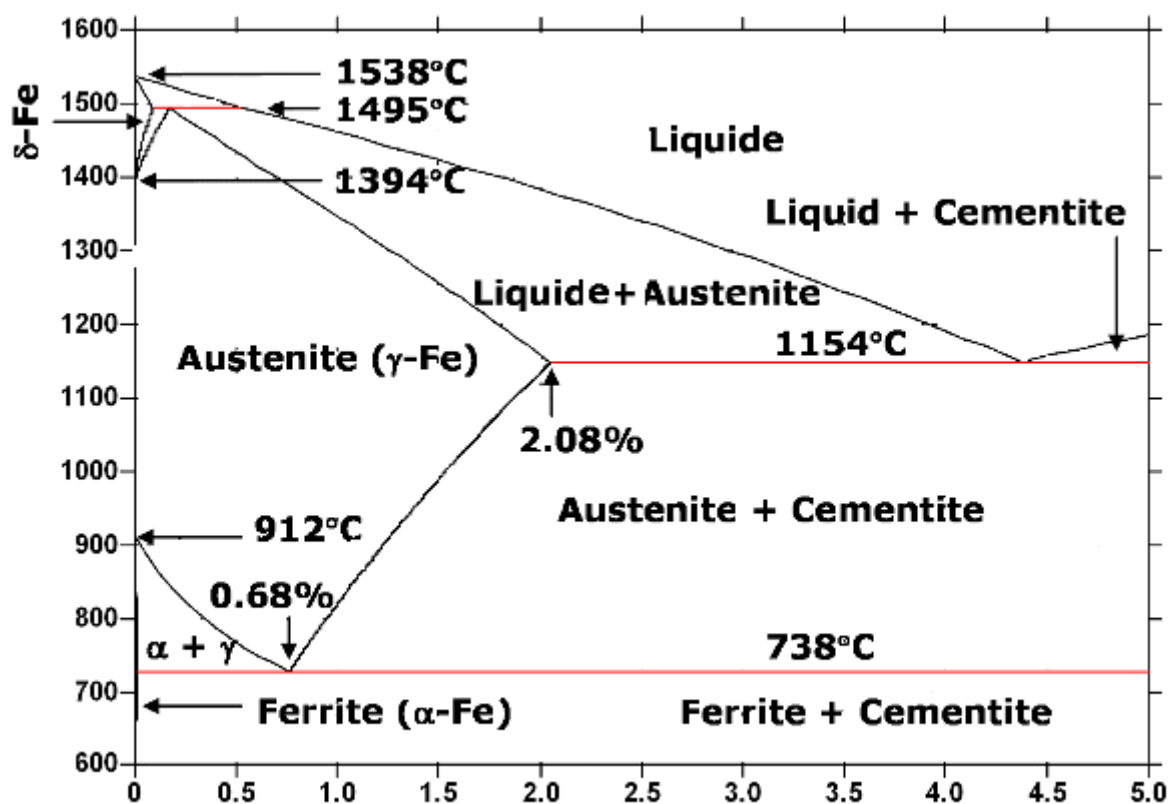


Figure 1 : diagramme de phase Fe-Fe<sub>3</sub>C

Le diagramme de phase (figure 1) montre la stabilité de chaque phase du système Fe-Fe<sub>3</sub>C en fonction de la température et de la quantité de carbone additionnée au fer pur.

Le fer  $\alpha$  existe aux températures inférieures à 912°C et supérieures à 1394°C. Aux températures supérieures à 1394 °C, le fer  $\alpha$  est désigné par Fe  $\delta$ . Le Fer  $\gamma$  existe entre 912°C et 1394°C. Si on étudie les courbes de refroidissement et de chauffage, on peut constater les transformations suivantes : le premier point d'arrêt apparaît à la température de 1538°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 :



La zone A3 correspond à la transformation :  $\text{Fe } \gamma \rightleftharpoons \text{Fe } \alpha$

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

Phase	Réseau Cristallin	Constante du Réseau en nm	Domaine D'existence	Solubilité Maximale	Désignation structure
Fe $\delta$	CC	a = 29,3 - T= 1425°C	1538 > T > 1394°C	0,10% - T=1495°C	$\delta$ -Ferrite
Fe $\gamma$	C.F.C	a = 36,4 - T=1100°C	1394 > T > 912°C	2,06% - T=1147°C	Austénite
Fe $\alpha$	CC	a = 28,66 - T=20°C	T < 912°C	0,02% - T=723°C	Ferrite
Fe <sub>3</sub> C	Rhomboédrique	a = 45,15 b = 50,84 - T = 20°C c = 67,30	T < 1330°C		Cémentite

Les points caractéristiques du diagramme sont :

- 1148°C : point eutectique qui correspond à une phase liquide en équilibre avec deux phases solides.
- 727°C : point eutectoïde qui correspond à une phase solide en équilibre avec 2 autres phases solides.
- 1487°C : point péritectique. Les valeurs sont les mêmes pour les deux diagrammes, car à haute température, cémentite et carbone graphite n'interviennent pas.

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

- aciers hypereutectoïdes contenant une teneur en carbone supérieure à 0,8 % en masse.
- aciers hypoeutectoïdes contenant une teneur en carbone inférieure à 0,8 % en masse.
- aciers eutectoïdes contenant une teneur en carbone égale à 0,8 % en masse.

### I.3 Etude du diagramme de phase Fe-C-Cu

Ne trouvant pas le diagramme ternaire Fe-C-Cu, nous devons nous contenter du diagramme Fe-Cu (Fig 2) :

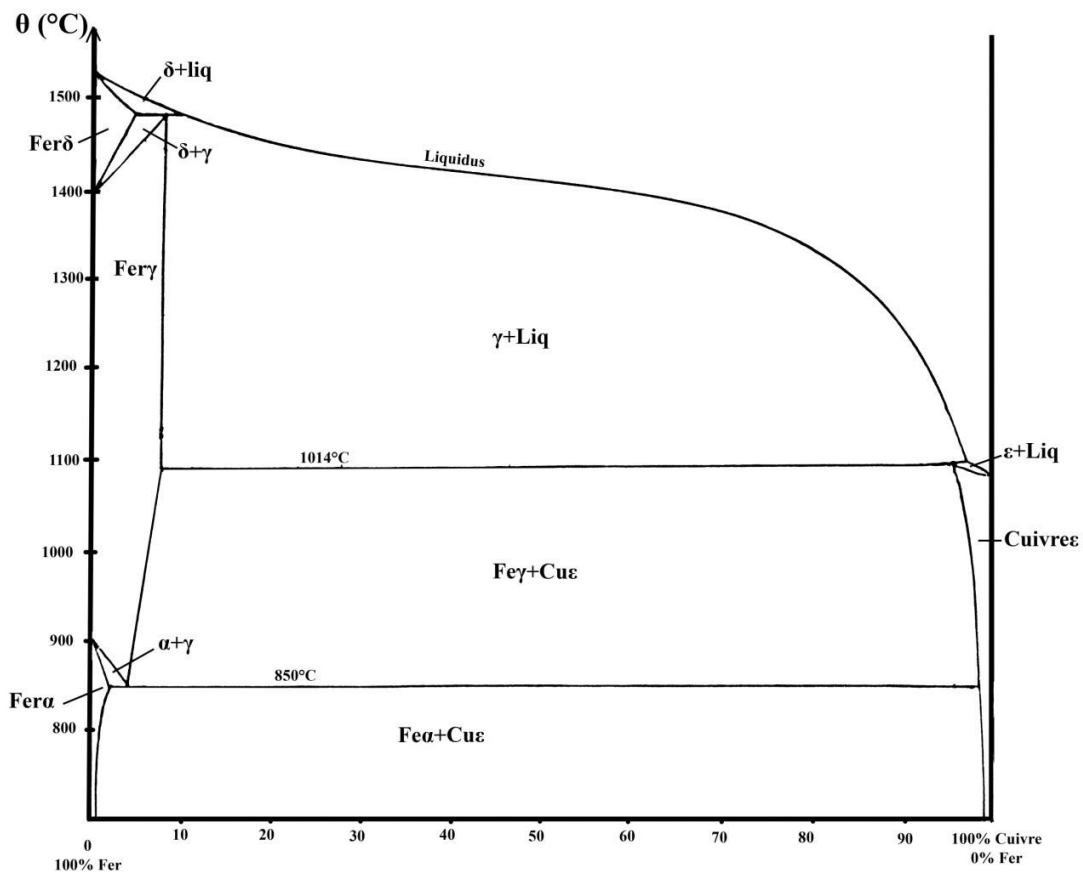


Figure 2 : diagramme de phase Fe-Cu

Le système fer-cuivre comporte les seules phases terminales  $\text{Fe } \delta$ ,  $\text{Fe } \alpha$  ou  $\text{Fe } \gamma$  et  $\text{Cu}$ . A l'état d'équilibre, il n'y a pas de séparation en deux liquides. Cependant, d'après certains auteurs, une démixtion se produit facilement de façon métastable. La solubilité du cuivre dans le fer est très faible à basse température.

Le cuivre n'est allié qu'à peu de nuances d'acier, car il provoque une grande sensibilité en surface lors des processus de transformation à chaud, ce qui fait qu'il est partiellement considéré comme une substance parasite pour l'acier. Des teneurs supérieures à 0,30% peuvent entraîner des durcissements structuraux. Dans les aciers non alliés et faiblement alliés, le cuivre provoque une notable amélioration de la résistance aux intempéries.

Pour notre TP, nous choisirons une composition avec 3% en masse de cuivre.

## **II – Procédés de fabrication**

### **II.1 Mise en forme des pastilles**

**La compressibilité** : la compaction de la poudre se fait grâce à une presse. La poudre est placée dans une matrice sur laquelle on vient appliquer une pression plus ou moins élevée : ce procédé est le compactage à froid. Son but est de réduire la porosité initiale de l'amas de poudre. Ainsi, de manière générale, plus la pression appliquée est forte, plus la porosité est faible. Le taux de compaction après pressage va directement influencer sur le taux de densification après frittage.

**Rôle du lubrifiant** : le lubrifiant ajouté dans la préparation initiale joue plusieurs rôles. Il permet de limiter les frottements de la poudre contre l'outillage ainsi que les frottements entre les grains. Son avantage lors de la compression est de faciliter la transmission des efforts et l'éjection des pièces. Cependant ses inconvénients ne sont pas négligeables : il limite la densification sous forte charge, laisse des vides lors du frittage et produit au moment du frittage des résidus polluants.

Le stéarate de zinc assure une bonne coulabilité de la poudre et produit une quantité minimale de résidus lors du frittage.

### **II.2 Le frittage**

Le procédé de frittage est régi par cinq paramètres :

- **le temps et la température** : plus la température est haute, plus court est le temps de frittage nécessaire pour atteindre le degré désiré de liaison entre les particules de poudre comprimée. Ceci constitue un dilemme car du point de vue de l'efficacité en production, un temps de frittage plus court serait préférable, mais cela implique de hautes températures de frittage, donc un frittage moins économique du fait d'un coût de maintenance des fours plus élevé.

- **la structure géométrique des particules de poudre** : à condition de frittage donné, les poudres fines ou à grande surface spécifique frittent plus vite que les poudres compactes plus grosses. Le dilemme est que les poudres plus fines sont plus difficiles à comprimer que les grosses, et les comprimés faits à partir de poudres plus fines ont un retrait plus important au frittage que ceux conçus avec des poudres plus grosses.

- **condition de mélange des poudres** : les composants d'un mélange de poudre sont sélectionnés en type et quantité dans le but d'atteindre les propriétés physiques désirées et les changements dimensionnels contrôlés pendant le frittage. Lors du frittage, un alliage des composants va se produire. A la température de frittage usuelle (1150°C), les processus d'alliage sont lents et l'homogénéisation des éléments d'alliage n'est pas atteinte. Mais si la poudre contient un élément dont la température de fusion est inférieure à celle du frittage alors sa phase liquide va accélérer le processus d'alliage.

- **la densité des comprimés de poudre** : plus la densité d'un comprimé est grande, plus la surface de contact entre les particules de poudre est importante, et plus les processus d'alliages et de liaisons sont efficaces.

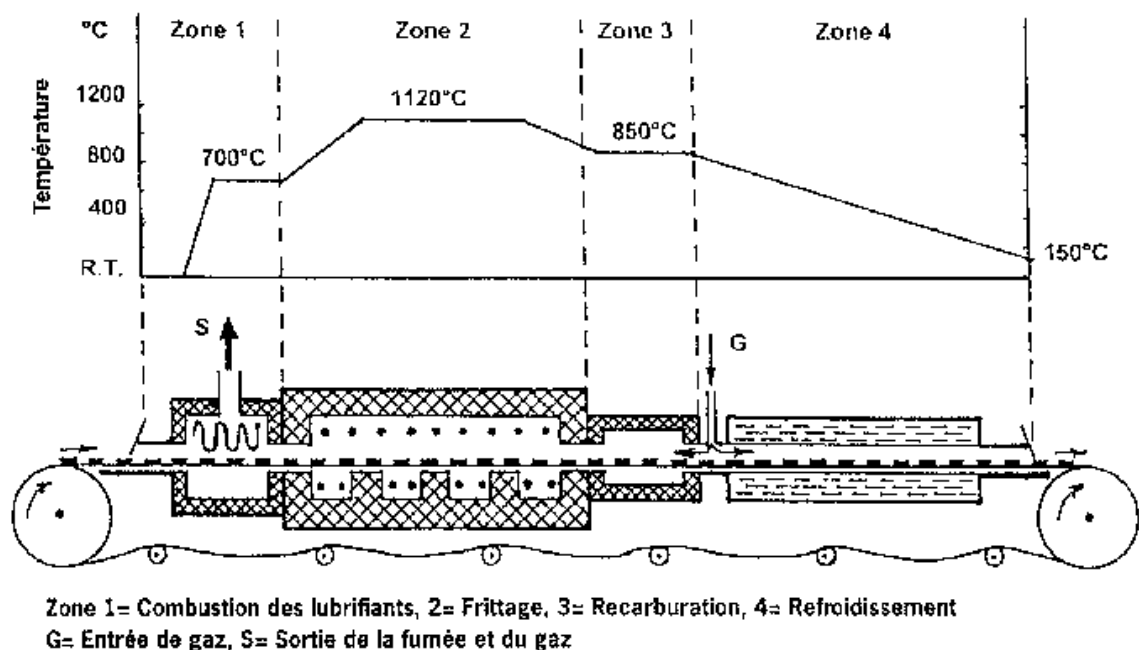
**- composition de l'atmosphère protectrice du four de frittage :** l'atmosphère protectrice doit remplir plusieurs fonctions pendant le frittage. Elle doit protéger les pièces à fritter de l'oxydation et réduire le plus possible la présence d'oxydes résiduels. Elle doit également prévenir la décarburation des matériaux contenant du carbone, et, vice versa, empêcher la carburation de matériaux exempts de carbone. Dans la métallurgie des poudres de fer, les atmosphères sont de trois types :

- Type réductrice-décarburente : Hydrogène ( $H_2$ ), Ammoniac dissocié
- Type réductrice-carburante : endogaz
- Type neutre : Azote cryogénique, avec addition mineure d'Hydrogène

Le four est l'outil majeur du frittage car c'est lui qui va permettre d'obtenir les trois types d'atmosphères décrites précédemment.

Un four en continu de conception récente, pour le frittage de pièces mécaniques en poudre de fer, se compose habituellement de quatre zones d'utilité différentes :

- 1 – la zone de délubrification où les lubrifiants sont brûlés entre 250 et 300°C
- 2 – la zone chaude où les pièces en poudre de fer sont frittées à 1120-1150°C
- 3 – la zone de restauration du carbone où les pièces décarburees superficiellement peuvent être recarburées à 800-900°C
- 4 – la zone de refroidissement où les pièces frittées sont refroidies jusqu'à environ 150-250 °C, avant d'être mises à l'air.



Dans l'idéal, chaque zone aurait besoin de sa propre combinaison de débit, direction et composition de l'atmosphère. Mais, ces conditions idéales ne peuvent pas être atteintes. Si les

fours ne sont pas correctement élaborés ou réglés, des problèmes thermodynamiques se produisent. Des défauts de forme ou des déficiences mécaniques de la pièce en résultent.

Il existe deux types de frittage :

- frittage en phase solide : dans un premier temps, il y a formation de ponts entre les grains, puis dans un second temps l'élimination de la porosité ouverte avec formation de porosité fermée. On observe une augmentation de la densification.

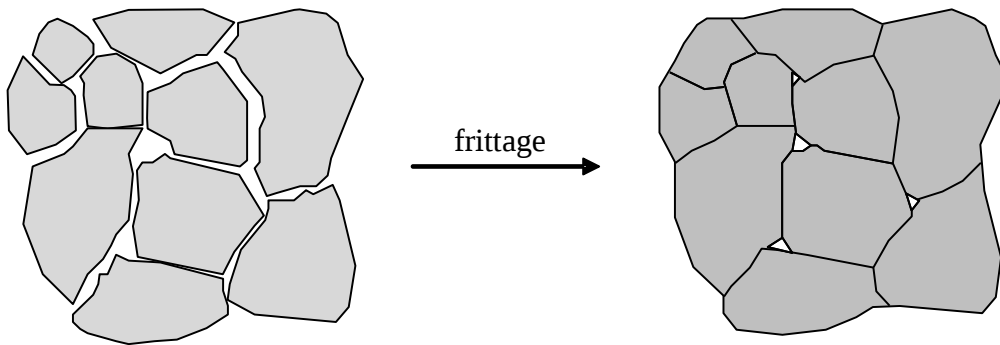


Figure 4 : principe du frittage en phase solide

- frittage en phase liquide : dans ce cas, une des espèces présentes a atteint son point de fusion au cours de la montée en température. On observe une diffusion de la phase liquide dans la phase solide, ce qui dépend de la température et du coefficient de diffusion des deux espèces.

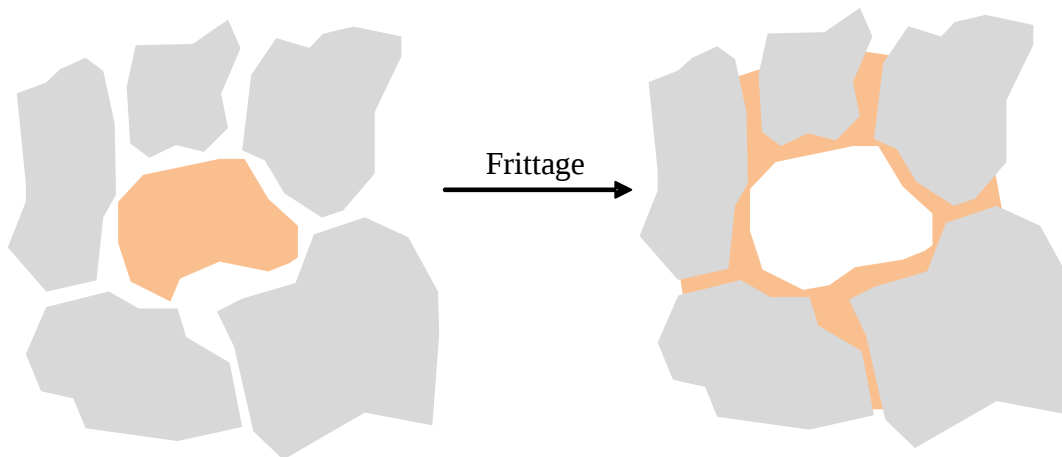


Figure 5 : principe du frittage en phase liquide



### III – Méthodes de caractérisation

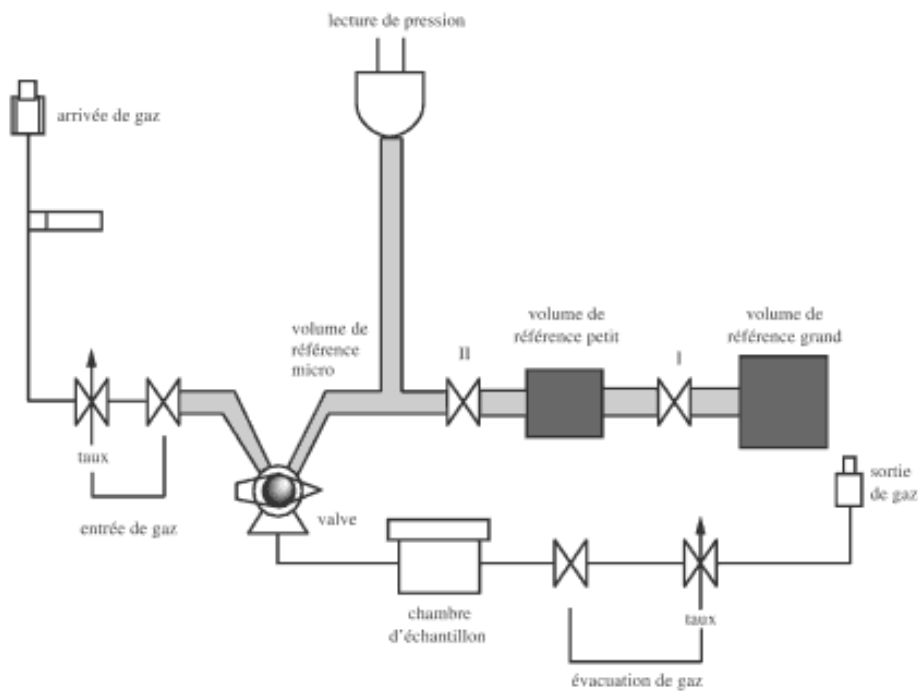
#### III.1 Etude de la densité

**Pycnométrie à gaz** : ce procédé permet de déterminer la masse volumique de la poudre. Le principe de la mesure est basé sur la loi des gaz parfaits, par la détermination de la différence de pression entre une cellule de référence vide et une cellule contenant l'échantillon. La technique consiste à remplir de gaz, jusqu'à une certaine pression  $P_1$ , le volume de référence, puis le gaz est pressurisé dans la chambre à échantillon jusqu'à la pression  $P_2$ . D'où l'équation :

$$P_2 (V_c - V + V_r) = (P_1 - P_2) V_r$$
 où  $V_c$  est le volume de la cellule de l'échantillon ( $6,99 \text{ cm}^3$ ),  $V_r$  le volume de la cellule de référence ( $5,87 \text{ cm}^3$ ),  $P_1$  la pression dans la cellule de référence, et  $P_2$  la pression après pressurisation dans la chambre d'échantillon.

Le volume de l'échantillon est donné par la relation :

$$V = V_c - V_r [(P_1/P_2) - 1]$$



**Calcul de la densité apparente** : pour une poudre, la densité apparente est obtenue en faisant le rapport masse sur volume apparent, ce qui donne la masse volumique apparente ; il faut alors faire le quotient de la masse volumique apparente par la masse volumique de l'eau.

Pour effectuer la mesure, nous utilisons le cône de Hall, composé d'un conteneur cylindrique de capacité  $V = 25 \text{ cm}^3$ . Le cylindre seul a une masse  $m_r = 83,8805 \text{ g}$ . Lors de la mesure, la poudre passe à travers le cône et remplit le conteneur de référence. Nous pesons le conteneur plein de poudre dont la masse sera notée  $m_{r+p}$ . La densité apparente est obtenue en utilisant l'équation suivante :

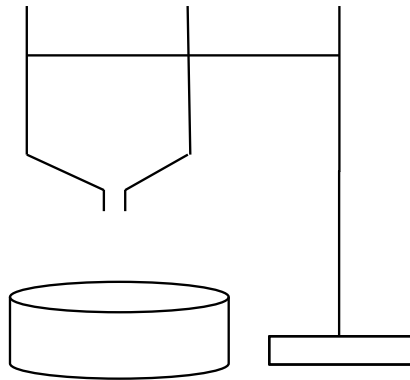
$$\rho = \frac{m_{r+p} - m_r}{V}$$

**Calcul de la densité géométrique** : pour calculer la densité géométrique, il suffit de mesurer les dimensions géométriques d'une pastille pour en calculer le volume et le diviser par la masse de celle-ci.

### III.2 Coulabilité

Elle permet de mesurer le temps nécessaire à l'écoulement de 50g de poudre métallique à travers l'orifice d'un entonnoir calibré de diamètre  $\phi=2,5\text{mm}$  de dimensions normalisées (NF A 95- 113). On définit l'aptitude d'écoulement du matériau par son débit exprimé en  $\text{g.s}^{-1}$ .

$$\text{Débit d'écoulement} = \frac{\text{masse de poudre (g)}}{\text{temps d'écoulement(s)}}$$



Représentation schématique du cône de Hall

C'est une méthode comparative.

La valeur de la masse donnée par la balance à une précision de  $\pm 0,05\text{g}$  et le temps d'écoulement mesuré par le chronomètre est donné à  $\pm 0,2\text{s}$ .

Ce type d'essai présente l'avantage d'être simple d'utilisation mais présente l'inconvénient d'être affecté par les conditions de mise en œuvre de l'essai : humidité, granularité du matériau, masse volumique... Ce test doit alors être limité à des études comparatives et ne peut prétendre exprimer des valeurs précises et une qualification intrinsèque du matériau.

### III.3 La dilatométrie

La dilatométrie permet de mesurer de façon précise les variations de dimension d'un solide et ainsi de suivre les différentes étapes du frittage ainsi que les mécanismes réactionnels qui se produisent. Nous avons donc réalisé une dilatométrie sous atmosphère inerte d'**argon** sur deux barreaux élaborés avec chacun des mélanges. On choisit cette atmosphère inerte pour éviter d'éventuelles réactions d'oxydation lors du frittage. Le cycle thermique appliqué a été le même pour les deux dilatométries : cycle de  $25^\circ$  à  $1200^\circ\text{C}$  vitesse de  $5^\circ\text{C/min}$  et un palier de 10 minutes à  $1200^\circ\text{C}$  ; on peut ainsi retrouver le coefficient de dilatation linéaire  $\alpha$  :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha T$$

Où  $\Delta l$  est la variation de longueur (longueur finale  $l_e - l_0$ ).

### III.4 Etude micrographique

**Le polissage** : la face inférieure de l'échantillon est plaquée sur le disque abrasif mis en rotation. Une lubrification assurée par l'écoulement d'un fluide sur le plateau est impérative pour éliminer les débris d'usure et réduire l'échauffement dû aux frottements. Il s'agit généralement d'eau ou de lubrifiants spéciaux.

On démarre avec de gros grains d'abrasifs, puis on diminue la grosseur de grains par étapes successives. On modifie la position de l'objet par rapport à lui-même par rotation et on change sa position sur le disque de polissage pour éviter d'avoir toujours la même trajectoire.

Pendant toutes les étapes, surtout en finition, il faudra utiliser un microscope optique pour vérifier la qualité du polissage et repérer en particulier les rayures dues à l'étape précédente du polissage ou la présence de grains d'abrasif incrustés.

La durée du polissage doit être la plus courte possible à toutes les étapes, car plus le polissage est long, plus il y a échauffement et dégâts mécaniques.

L'objectif à atteindre est de ne plus voir de rayures et de défauts. Les principaux défauts observés sont :

- des bords d'échantillon arrondis, quand l'échantillon n'est pas tenu bien à plat.
- des reliefs dus à des variations de structure. Pour un échantillon enrobé, la dureté de l'enrobage doit être adaptée à celle de l'échantillon.

**L'attaque chimique** : le réactif utilisé est du nital, qui est une solution alcoolique contenant 3% d'acide nitrique. Cette attaque permet de faire apparaître la structure du métal en révélant ses différents constituants, c'est-à-dire les différents types de grains. Il s'agit de grains dont les dimensions sont de l'ordre de quelques dizaines de micromètres visibles par observation au microscope optique. Dans le cas général des aciers l'attaque au nital fait apparaître en sombre les grains de perlite, c'est à dire le constituant contenant le carbure de fer (cémentite).

## Partie 2 : Résultats expérimentaux

## I – Matières premières

Nous avons à notre disposition les poudres suivantes : fer, carbone (noir de fumée), stéarate de zinc et cuivre.

Les densités théoriques de chaque composé sont données dans le tableau suivant :

	Densité théorique
Fer	7,87
Carbone	2,26
Cuivre	8,92
Stéarate de zinc	1,10

Tableau 1 : densité des matières premières

## II – Mise en forme des aciers

### II.1 Elaboration des poudres

Il faut préparer 100g de mélange, contenant 0,8 % de stéarate de zinc (ce qui équivaut à 0,8 g). Ce dernier a pour formule chimique  $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CO}_2]_2\text{Zn}$ . Il faut donc tenir compte du carbone présent dans ce composé pour prélever la poudre de carbone.

Masse molaire du stéarate :  $M = 631,37 \text{ g.mol}^{-1}$

Masse molaire de carbone dans le stéarate :  $M = 36 \times 12 = 432 \text{ g.mol}^{-1}$

Pourcentage de carbone dans le stéarate :  $(432 / 631,37) \times 100 = 68,4 \%$

Donc la masse de carbone dans le stéarate est :  $m_{\text{C stéa}} = 0,684 \times 0,8 = 0,5472 \text{ g}$

Notre acier a pour formule  $\text{Fe}_{0,7}\text{C}$ .

Masse de carbone totale :  $m_{\text{C totale}} = (0,7 / 100) \times 100 = 0,7 \text{ g}$ .

Masse de carbone à prélever :  $m_{\text{C totale}} - m_{\text{C stéa}} = 0,7 - 0,5472 = \underline{\underline{0,1528 \text{ g}}}$

D'où la masse de fer à peser est :

$$m_{\text{Fe}} = 100 - m_{\text{C totale}} - m_{\text{stéa sans carbone}} = 100 - 0,7 - (0,8 - 0,5472) = \underline{\underline{99,0472 \text{ g}}}$$

Et dans le cas de l'acier allié, de formule  $\text{Fe}_{0,7}\text{C}_3\text{Cu}$  :  $m_{\text{Fe}} = 100 - m_{\text{C totale}} - m_{\text{stéa sans carbone}} - m_{\text{Cu}}$   
 $= 100 - 0,7 - (0,8 - 0,5472) - 3 = \underline{\underline{96,0472 \text{ g}}}$

### II.2 Etude de densité

**Calcul de la densité vraie :** par pycnométrie, nous avons mesuré la densité de chaque mélange, et nous avons comparé les valeurs obtenues avec la densité théorique correspondante, en faisant la somme pondérée par les pourcentages de chaque composé des différents mélanges.

Mesures relatives à l'acier non allié :

Fe <sub>0,7</sub> C	Masse de l'échantillon (g)	Volume de l'échantillon (cm <sup>3</sup> )	Densité expérimentale
Essai 1	2,0109	0,3108	6,470
Essai 2	2,0093	0,2794	7,1914

La densité théorique est de 7,80. Le pourcentage d'erreur s'élève à 17% pour le 1<sup>er</sup> essai et à 7,8% pour le 2<sup>ème</sup> essai.

Mesures relatives à l'acier non allié :

Fe <sub>0,7</sub> C <sub>3</sub> Cu	Masse de l'échantillon (g)	Volume de l'échantillon (cm <sup>3</sup> )	Densité expérimentale
Essai 1	1,6543	0,2521	6,56
Essai 2	1,6541	0,2907	5,69

La densité théorique est de 7,84. Le pourcentage d'erreur s'élève à 16,3% pour le 1<sup>er</sup> essai et à 27,4% pour le second.

Les erreurs sont importantes dans les deux cas. Ceci est explicable par l'oxydation du mélange pendant les temps de mesures.

**Calcul de la densité apparente :** la densité apparente est l'équivalente de la densité non tassée. Les résultats sont reportés dans le tableau suivant :

	Densité non tassée
Fe-C	3,31
Fe-C-Cu	3,44

On remarque que les particules de poudre ont une géométrie qui ne leur permet pas de s'organiser de manière compacte, il reste beaucoup de vide. La masse volumique d'un solide pulvérulent dépend également de l'assemblage moléculaire et, par conséquent, varie avec la structure cristalline et le degré de cristallinité.

Pour la poudre de Fe-C non tassée, le pourcentage de porosité est :

$$1 - d_1(\text{non tassé})/d_{th1} = 1 - (3,31/7,80) = \mathbf{57,5\%}$$

Pour la poudre de Fe-C-Cu non tassée, le pourcentage de porosité est :

$$1 - d_2(\text{non tassé})/d_{th2} = 1 - (3,44/7,84) = \mathbf{56,1\%}$$

### II 3 Coulabilité

Pour l'acier, nous avons réalisé deux séries de mesures, l'une avec une masse de 50g et l'autre avec 100g, pour observer si le temps d'écoulement est proportionnel ) la masse initiale.

Pour 50g :

Temps (s)
29.4
28.5
27

Pour 100g :

Temps (s)
57
57
58

On remarque bien la proportionnalité entre le temps et la masse , c'est-à-dire que le temps diminue de moitié quand la masse diminue de moitié également.

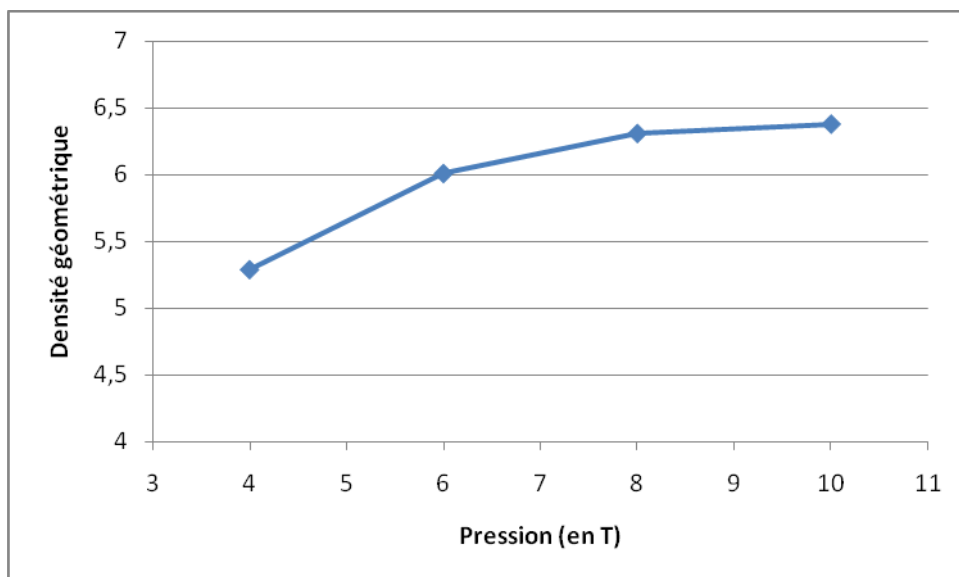
Pour l'acier allié, nous avons les temps suivants pour une masse de 50g :

Temps (s)
33.04
30
31

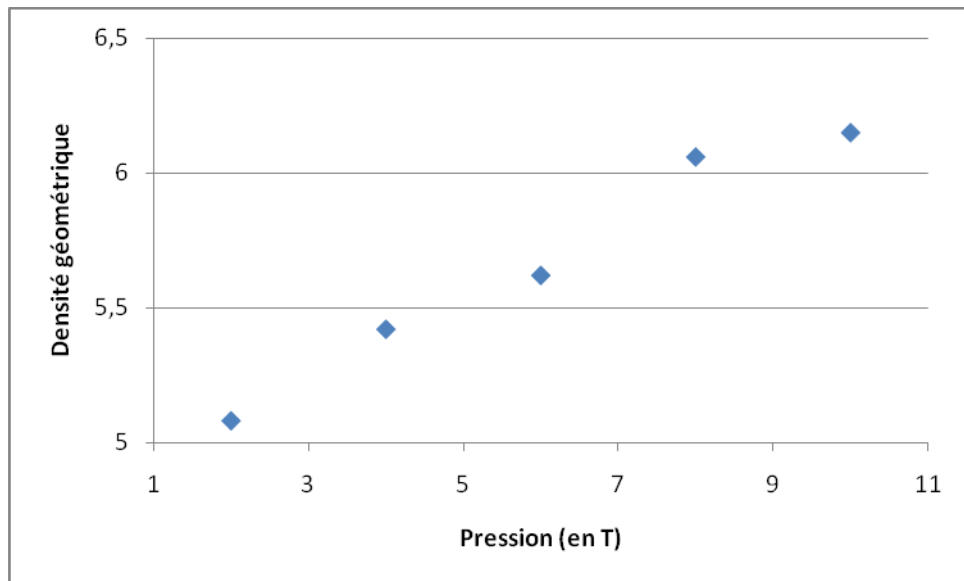
Le temps d'écoulement est légèrement plus élevé pour l'acier allié. Cela doit provenir de la taille des grains de cuivre, plus importante. C'est -à-dire que plus les grains sont gros, plus le débit ralentit.

#### II.4 Compressibilité

On trace la courbe représentant la densité géométrique en fonction de la pression appliquée, pour pouvoir déterminer la pression à laquelle les pastilles ont une meilleure densité.



Courbe de compressibilité de l'acier non allié



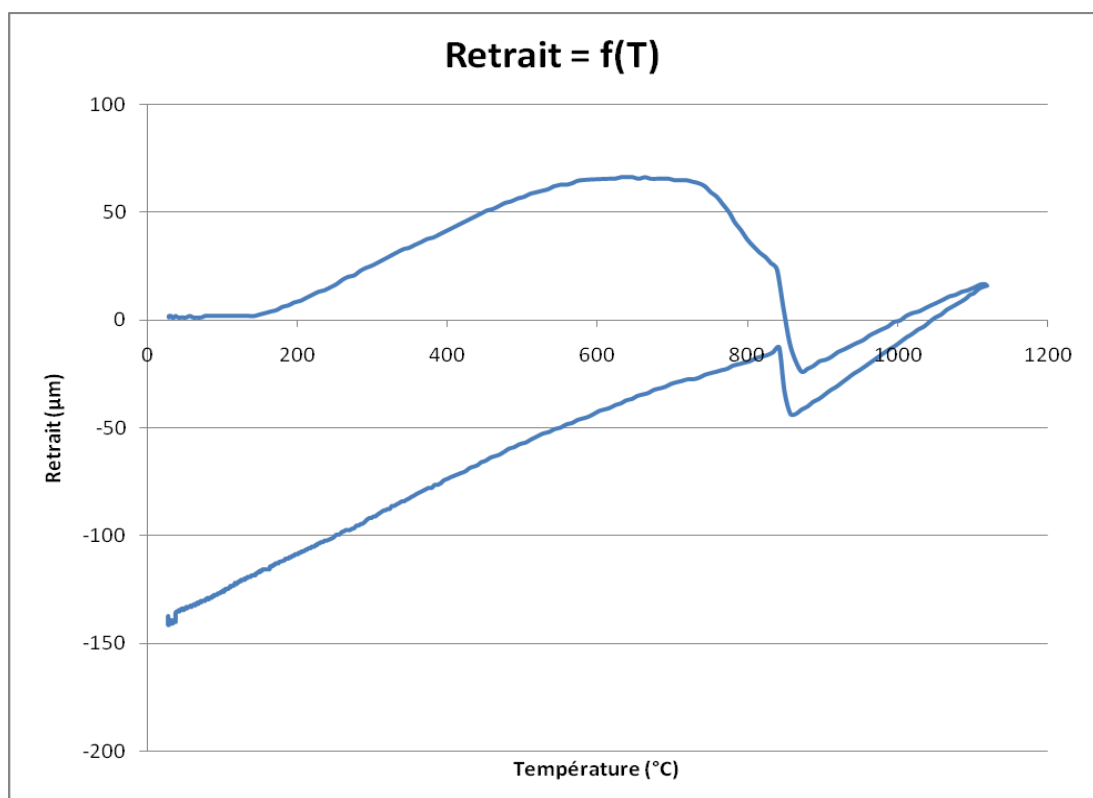
Courbe de compressibilité de l'acier allié

La meilleure densité pour réaliser la phase de frittage correspond à une pression de 8T. Les faibles pressions sont éliminées de suite car elles ne suscitent pas une bonne fixation de structure.

### **III – Traitement thermique**

#### **III.1 Dilatométrie**

##### **□ Acier Fe-C**



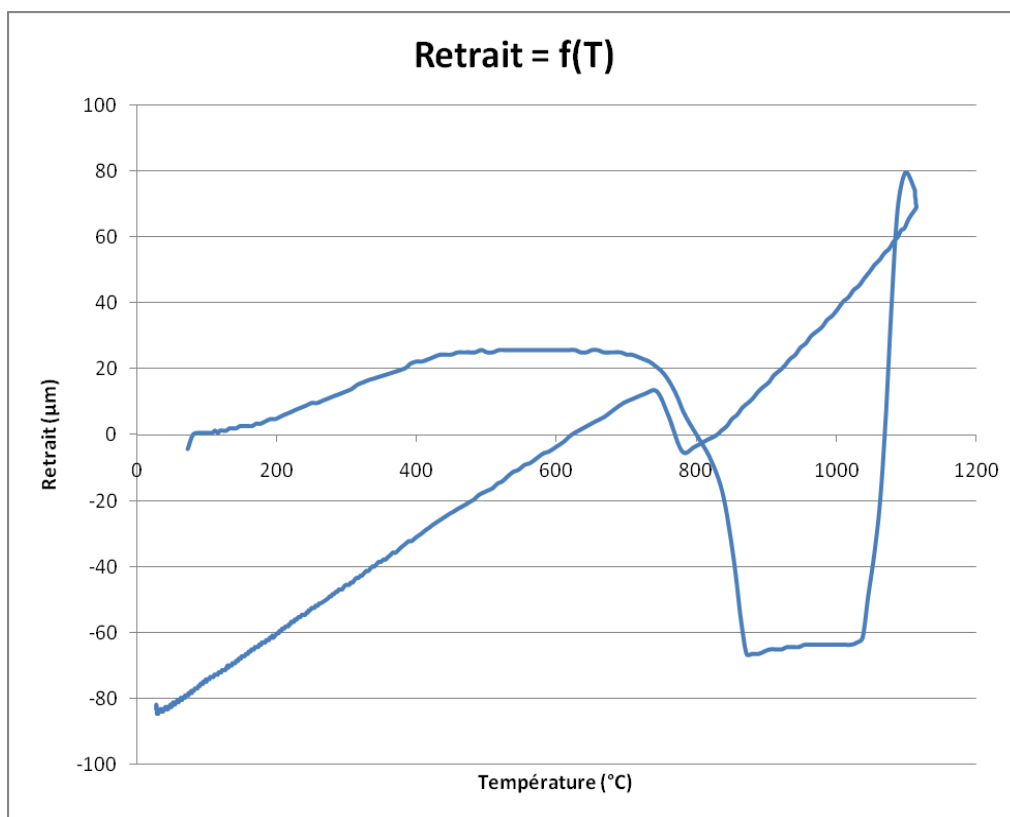


Jusqu'à 740°C, le carbone ne diffuse pas dans le fer. Nous sommes en présence d'une solution solide de fer  $\alpha$  dont la structure se dilate avec l'augmentation de la température.

De 740°C à 850°C, nous observons un retrait qui correspond au changement de structure du fer  $\alpha$  en fer  $\gamma$ . En effet on passe d'une structure cubique centrée à une structure cubique face centrée. Le paramètre de maille de la structure CC est plus grand que celui du CFC d'où le retrait. Cette transformation est dite allotropique.

Nous avons programmé un palier de 10 minutes à 1200°C. Le phénomène de retrait continue ce qui traduit la poursuite de la densification du matériau.

### □ Acier allié Fe-C-Cu



### III. 2 Etude de densification

Nous déterminons le taux de densification des pastilles obtenues après les différents cycles de frittage avec la formule suivante :

$$\tau = \frac{d_{\text{géométrique}}}{d_{\text{théorique}}}$$

Nous avons réalisé 2 frittages différents en modifiant la durée du temps de palier à 1200°C : dans le premier cas, ce sera un palier d'une heure, et dans le second de 4h, avec une montée en température de 200°C/heure. Le tout sous atmosphère d'azote.

Les valeurs obtenues sont référencées dans le tableau suivant :

	Densité géométrique	Densité théorique	Taux de densification
Pastille Fe-C cycle 1	6.07	7.80	77.8%
Pastille Fe-C cycle 2	5.78	7.80	74.1%
Pastille Fe-C-Cu cycle 1	5.50	7.84	70.1%
Pastille Fe-C-Cu cycle 2	5.41	7.84	69%

Nous observons que les valeurs de densités géométriques sont assez inférieures aux valeurs théoriques. De plus, nous constatons que la densification est meilleure lors de l'élaboration de l'acier non-allié.

### IV – Etude micrographique

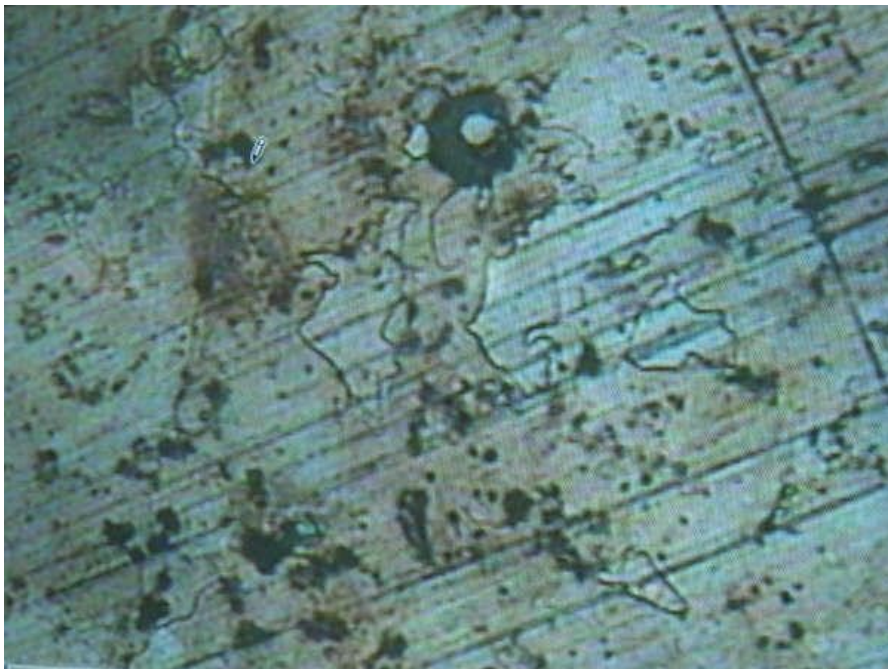


Photo 1 de l'acier non allié

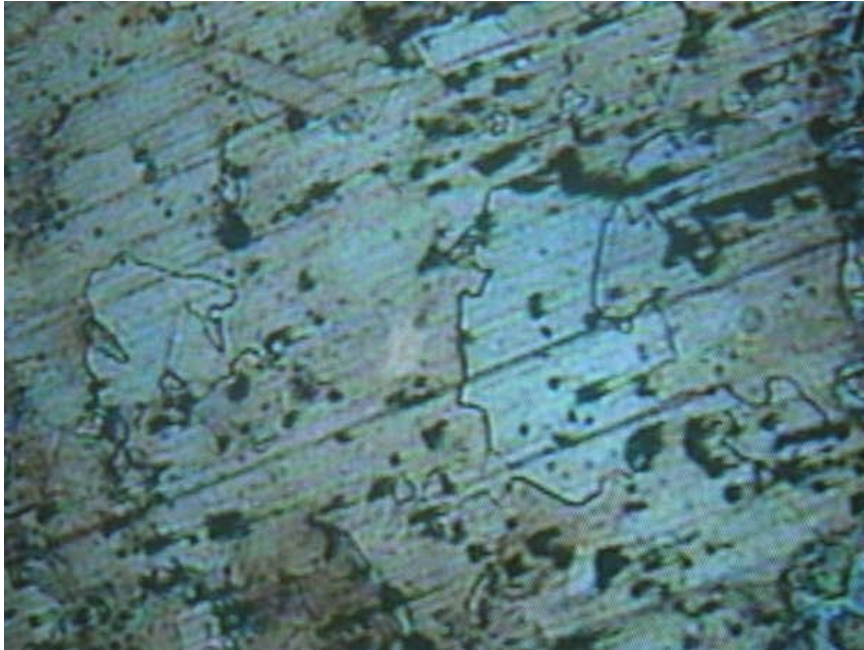
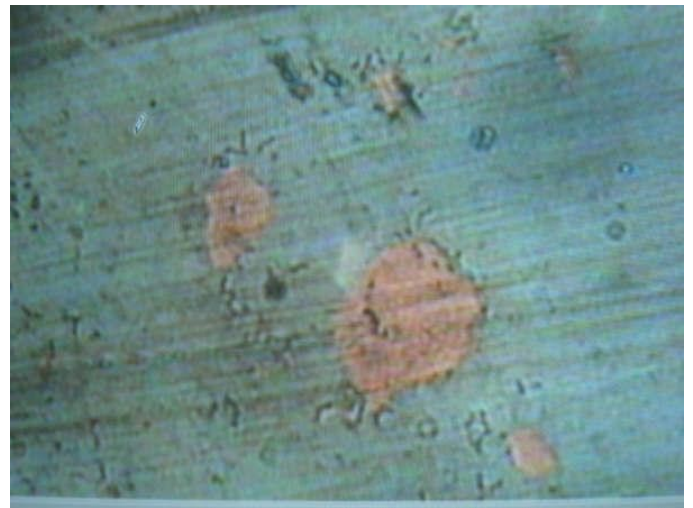
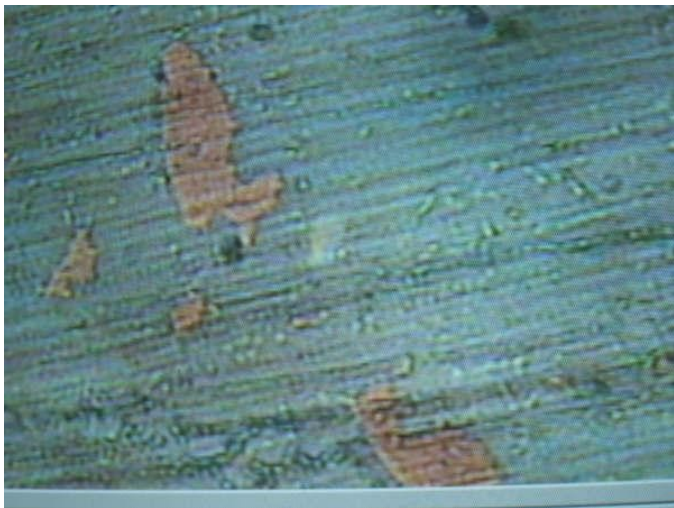


Photo 2 de l'acier non allié

On pourrait s'attendre à observer de la perlite, c'est -à-dire un mélange de cémentite et de ferrite  $\alpha$ . Seulement notre acier de départ contenait une trop faible teneur en carbone pour qu'on puisse apercevoir cette phase.

A la température ambiante, notre acier contenait au total 0,7% de carbone (si on prend en compte le carbone présent dans le stéarate de zinc), il fait donc partie de la catégorie des aciers hypoeutectoïdes (dont la teneur en carbone est inférieure à 0,85%). Ceux-ci sont constitués de ferrite et de perlite. Mais compte tenu de ce qui a été dit précédemment, la phase que l'on observe au microscope optique est sans doute de la ferrite.



Les photos ci-dessus correspondent à l'acier allié, lors du cycle thermique se déroulant en dessous de la température de fusion du cuivre ( $1084^{\circ}\text{C}$ ). On peut remarquer que celui-ci n'a pas entièrement fondu et qu'il en reste des grains.

# Bibliographie

*Chimie générale*, Zumdahl S, Gagnon J.M, Rouleau M  
De Boeck Université, 1999

*Chimie*, Atkins P, Jones L, Pousse A  
De Boeck Université, 1998

*Traité des matériaux tome 2*, Degallaix S, Ilshmer B  
PPUR presses polytechniques, 2007

*Les microstructures des acier et des formes : genèse et interprétation*, Durand-Charre M  
EDP Sciences Editions, 2003

*Guide de préparation des échantillons pour la microscopie électronique en transmission : tome 2 techniques*, Ayache J, Beaunier L, Ethret G, Pottu-Boumendil J, Laub D  
Université de St-Etienne, 2007

<http://www.metaux.ulg.ac.be/Eichierpourtelech/labo1.pdf>

[http://www.plasturgie.net/plasturgienet\\_demo/base\\_moule/definition-thermes/alliage.htm#Cuiivre%20\(Cu\)](http://www.plasturgie.net/plasturgienet_demo/base_moule/definition-thermes/alliage.htm#Cuiivre%20(Cu))

<http://musty-s-cafarnaeum.chez-alice.fr/infosciences/mdp/ifmdp3.htm>

[http://antoine.lepeltier.free.fr/fiches/SI/Trait\\_thermik.doc](http://antoine.lepeltier.free.fr/fiches/SI/Trait_thermik.doc)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme\\_de\\_transformations\\_en\\_refroidissement\\_continu](http://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_transformations_en_refroidissement_continu)

<http://www.metaux.ulg.ac.be/Eichierpourtelech/labo1.pdf>

<http://pifabre.club.fr/ARBRE/ARIES/fleches.html>