

Concevoir Interaction Procédé – Matériau

Fonderie

Elaboration de fonte à graphite sphéroïdal (FGS)



Objectifs de la séquence

Le but de ce TP est d'analyser le processus d'élaboration d'une fonte à graphite sphéroïdal au travers de l'analyse thermique. Les traitements suivants seront effectués :

- Inoculation
- Sphéroïdisation

L'impact de ces traitements sera qualifié et quantifié au travers de trois outils :

- l'analyse thermique
- l'analyse spectrométrique
- l'analyse des microstructures obtenues

Matériels disponibles

- Différentes charges métalliques avec leur composition chimique (disponible dans un fichier excel)
- Four à induction
- Produits de traitement : inoculant et sphéroïdisant
- Laboratoire de matériau : polissage, microscope optique
- Matériels pour effectuer des analyses thermiques
- Moules :
 - Godets d'analyse thermique avec thermocouples type K : vide, tellure, tellure + soufre
 - Coquille métallique : éprouvette de spectrométrie
 - Moule en sable
 - Éprouvette de traction
 - Cylindre

Organisation

- Groupe de 8 étudiants
- Durée : 4h

Compte-rendu

Le compte-rendu comprend :

- les réponses aux différentes questions posées
- un fichier excel associé à l'exploitation des données expérimentales.

Il est clair et concis, et comprend toutes les remarques pertinentes sur le sujet étudié. Il est préférable de privilégier les tableaux, figures et micrographies plutôt que des explications longues et alambiquées. Les unités seront indiquées pour les différentes grandeurs citées.

Partie 1 : Préparation du chargement

Calcul des compositions chimiques visées aux différentes étapes de la manipulation

Afin de vous faciliter la démarche, nous avons déterminé pour vous le lit de fusion initial à réaliser afin d'atteindre, après les différents traitements (inoculation et sphéroïdisation dans la poche), la composition finale souhaitée de la pièce.

Q1. A partir des masses des différents produits fournis pour élaborer le lit de fusion initial (feuille fournie par l'enseignant en début de TP), de la composition chimique des différents produits et du rendement de ces derniers (fichier excel), calculer successivement le % théorique de carbone et le % théorique de silicium attendus :

- dans le lit de fusion initial
- dans la pièce coulée (lit de fusion initial + produits de traitements)

Rmq : repartir du tableur établi en ED

Q2 : Déterminer le %m de carbone équivalent :

- dans le lit de fusion initial
- dans la poche, une fois les traitements effectués

Q3. Quel est le rôle de l'acier éventuellement introduit dans le bain de fusion ?

Q4. En vous appuyant sur le diagramme d'Ellingham fourni dans l'Annexe 1, donner une des raisons pour laquelle le rendement du Magnésium est si faible. Quels sont les éléments d'addition qui pourraient être ajoutés dans le lit de fusion afin d'améliorer son action ?

Partie 2 : Elaboration de la fonte GS et contrôle du bain de fusion

Méthode d'élaboration du lit de fusion initial + Ajustement

Les traitements du bain liquide se feront selon la méthode « Tundish cover » (Figure 1).

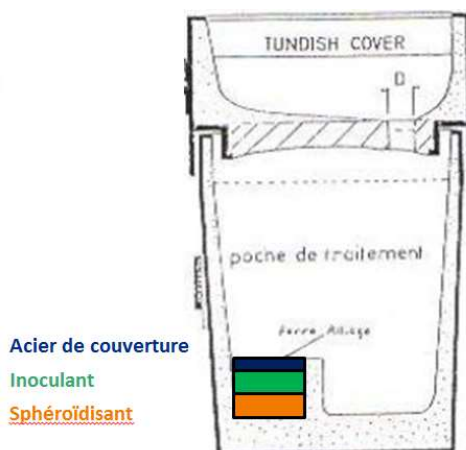


Figure 1. Méthode tundish cover

Deux types de traitements vont être effectués sur le métal en fusion :

- Une inoculation : FeSi (Inoculin 90)
- Une sphéroïdisation : FeSiMg (Nodulant 116 RE)

Q5. Quelles sont les rôles respectifs de ces deux traitements ? Quels sont les mécanismes physiques mis en jeu ?

Q6. Quel est le rôle de l'acier de couverture présent initialement dans la poche ?

Une fois que l'ensemble {fonte neuve + retour de fonte + acier} est à l'état liquide dans le four, les charges restantes sont progressivement introduites : Ferro-silicium, Manganèse (Gimel) puis Graphite. Lors de l'introduction, veillez à abaisser la puissance du four pour éviter la création abusive d'oxydes (turbulences liées à l'utilisation d'un four à induction).

Une fois le lit de fusion initial préparé, coulez successivement :

- M1 : une médaille de spectrométrie
- AT11 : un échantillon pour une analyse thermique dans un godet Tellure
- AT12 : un échantillon pour une analyse thermique dans un godet vide

La fonte coulée dans le godet vide a un module thermique et une composition chimique qui assure la solidification sous forme de fonte grise.

Q7. A cette étape de l'élaboration, la fonte coulée dans le godet vide (AT12) est-elle une fonte grise lamellaire ou sphéroïdale ?

Q8. Sachant que le Tellure est un élément chimique carburigène, quel va être son action sur la fonte coulée dans le godet AT11 ?

Q9. Au vu des courbes d'analyse thermique théorique obtenue pour les fontes blanches et pour les fontes grises, quelles informations allons-nous pouvoir récupérer respectivement de ces deux analyses thermiques ? Autrement dit, à quoi servent-elles ?

Q10. En vous appuyant sur l'Annexe 2, analyser les résultats des deux analyses thermiques AT11 et AT12, et déterminer les valeurs des variables suivantes :

- %m C
- %m Ceq
- %m Si

Q11. Les résultats de l'analyse thermique (Q10) sont-ils en adéquation avec les résultats théoriques attendus à cette étape de l'élaboration (Q1) ?

Q12. En comparant les résultats théoriques attendus (Q1) et les résultats expérimentaux obtenus (Q10), calculer les éventuelles quantités de ferro-silicium, de graphite et/ou d'acier à rajouter et/ou « retirer » dans le bain de fusion pour effectuer l'ajustement nécessaire. Préciser les calculs effectués.

Une fois le lit de fusion ajusté, coulez :

- M2 : une médaille de spectrométrie
- AT21 : un échantillon pour une analyse thermique dans un godet Tellure

Traitements du lit de fusion ajusté

Les traitements d'inoculation et de sphéroïdisation peuvent maintenant être effectués. Une fois le métal préparé, vous coulerez successivement :

- M3 : une médaille de spectrométrie
- A31 : un échantillon pour une analyse thermique dans un godet Tellure + Soufre
(Soufre nécessaire à cause du Mg maintenant présent dans la fonte - sphéroïdisant)
- A32 : un échantillon pour une analyse thermique dans un godet vide
- le cylindre et les éprouvettes de traction

Q13. En vous appuyant sur l'Annexe 2, analyser les résultats de l'analyse thermique AT21, et déterminer les valeurs des variables suivantes :

- %m C
- %m Ceq
- %m Si

Q14. En vous appuyant sur l'Annexe 2, analyser les résultats des analyses thermiques AT31 et AT32, et déterminer les valeurs des variables suivantes :

- %m C
- %m Ceq
- %m Si

Partie 3 : Contrôle de la fonte obtenue

Analyse des résultats d'analyses thermiques

Après ajustement

Q15. Quelle est la composition chimique attendue à la suite de l'ajustement effectué (Q12) ? Quelle est la composition réelle obtenue (Q13) ? Conclure quant à l'efficacité de l'ajustement effectué. Justifier les éventuelles sources de différences entre la cible et le résultat attendu.

Pièce coulée

Q16. Quelle est la composition chimique attendue du cylindre coulé (Q1) ? Quelle est la composition réelle obtenue (Q14) ? Justifier les éventuelles sources de différences entre la cible et le résultat attendu.

Quelle microstructure de la matrice est attendue ?

La microstructure de la matrice dépend à la fois (diagramme de Laplanche) :

- de la vitesse de refroidissement de la pièce, et donc par conséquent de sa géométrie (module thermique)
- du %m de carbone
- du %m de silicium

Q17. Calculer le module thermique du cylindre coulé.

Q18. En vous appuyant sur les Annexes 3 et 4, déterminer la microstructure :

- de la matrice finale visée, au vu des éléments présents théoriquement dans ce cylindre (Q1) ?
- de la matrice finale obtenue expérimentalement, au vu des résultats d'analyse thermique obtenue (Q13)

Analyses micrographiques

Afin d'analyser les échantillons réalisés, vous effectuerez les manipulations suivantes :

- Polissage d'un échantillon prélevé dans le cylindre
 - Echantillon poli sans attaque : observation du graphite
 - Echantillon poli + attaque nital : observation de la nature de la matrice
- Rectification des médailles de spectrométries M1, M2 et M3

Q19. En vous appuyant sur votre cours et sur l'Annexe 5, légender la/les microstructures observées (microscope optique).

Q20. Comparer les résultats expérimentaux obtenus avec les résultats attendus (Q18). Justifier les éventuelles différences.

Partie 4 : Bilan et ouverture

Q22. Dans le cadre d'élaboration d'une fonte GS, quels sont les méfaits d'une surchauffe trop faible ? trop importante ?

Q23. Au vu des manipulations effectuées et des résultats obtenus, quel est l'élément indispensable dans la démarche qui doit être maîtrisé pour qu'une fonderie puisse produire des pièces conformes en termes de composition chimique ?

Q24. Une pièce moulée à épaisseurs variables doit être fabriquée pour un client. Ce dernier souhaite obtenir une microstructure homogène dans toute la pièce moulée (matrice identique). Quelles solutions techniques le fondeur peut-il apporter à ce client ?

Annexe 1 : Diagramme d'Ellingham de création des oxydes

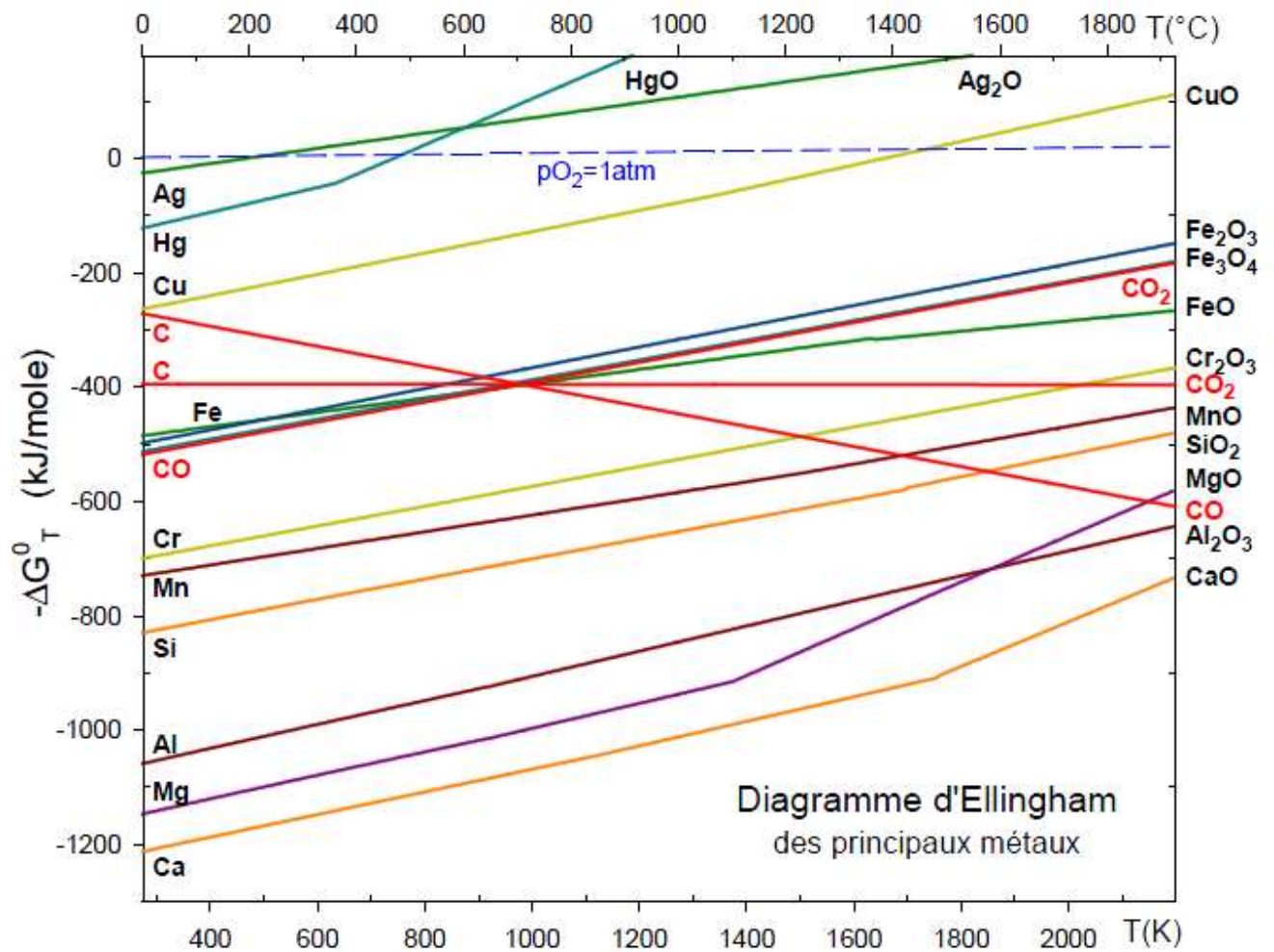


Figure A11. Enthalpie libre molaire de formation des oxydes à partir du métal pur/ oxygène pur
Diagramme d'Ellingham ($P=1 \text{ atm}$)

Annexe 2 : Analyse thermique

Le contrôle par analyse thermique est un contrôle usuel utilisé dans les fonderies pour contrôler en temps réel :

- la composition chimique des alliages coulés ;
- l'efficacité des traitements effectués dans le bain liquide.

Le dispositif expérimental nécessaire à ce type d'analyse est présenté sur la Figure A21.

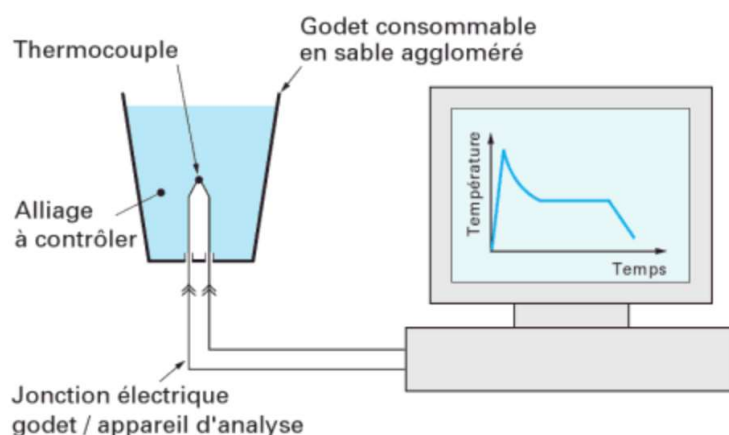


Figure A21 – Dispositif expérimental

Ce dispositif permet de récupérer l'évolution de la température de l'alliage en fonction du temps. Les points d'inflexion et les paliers de températures observés indiquent des températures caractéristiques de l'alliage telles que le liquidus, le solidus et les températures de transformations isothermes. Chaque alliage a une signature thermique bien particulière comme l'illustre la Figure A22.

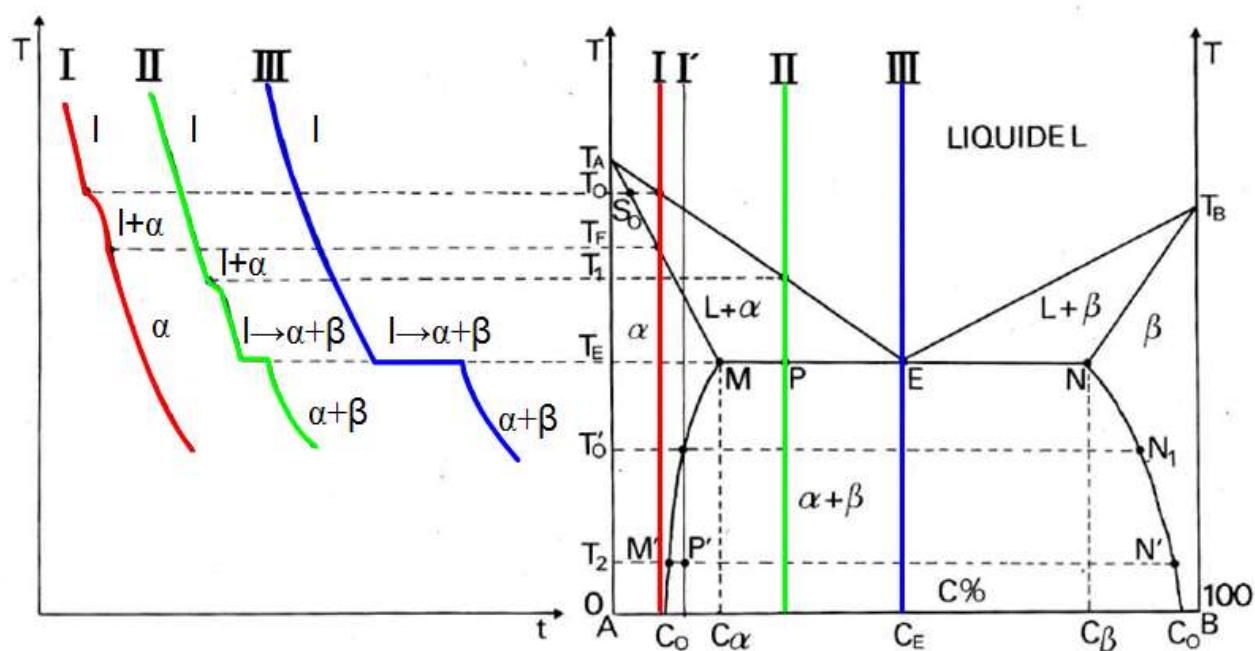


Figure A22 - Détermination de la composition chimique d'un alliage par analyse thermique

En ce qui concerne les fontes, voici la forme des courbes d'analyse thermique attendues (Figure A23) :

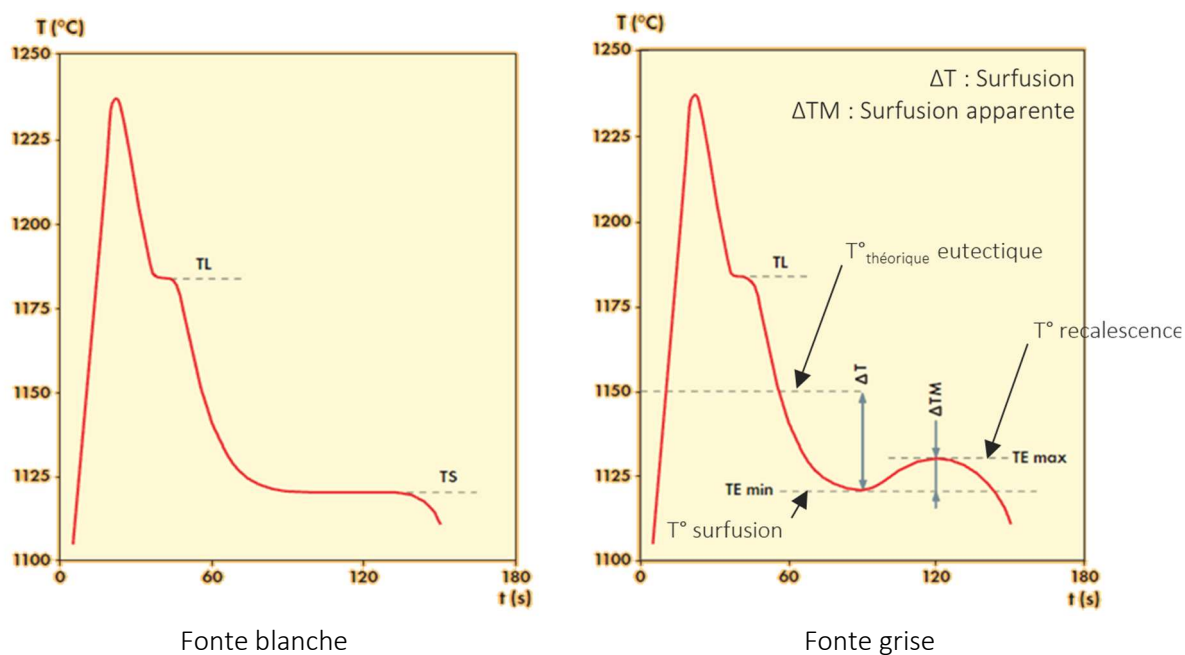


Figure A23 – Courbes d'analyse thermique théorique des fontes blanches et grises

Afin de remonter à la composition chimique de la fonte, il est nécessaire de relever les valeurs du liquidus et du solidus sur la courbe d'analyse thermique de la fonte blanche. En fonction de la nature du godet d'analyse thermique utilisé, les équations présentées dans les Figures A24 et A25 doivent être utilisées.

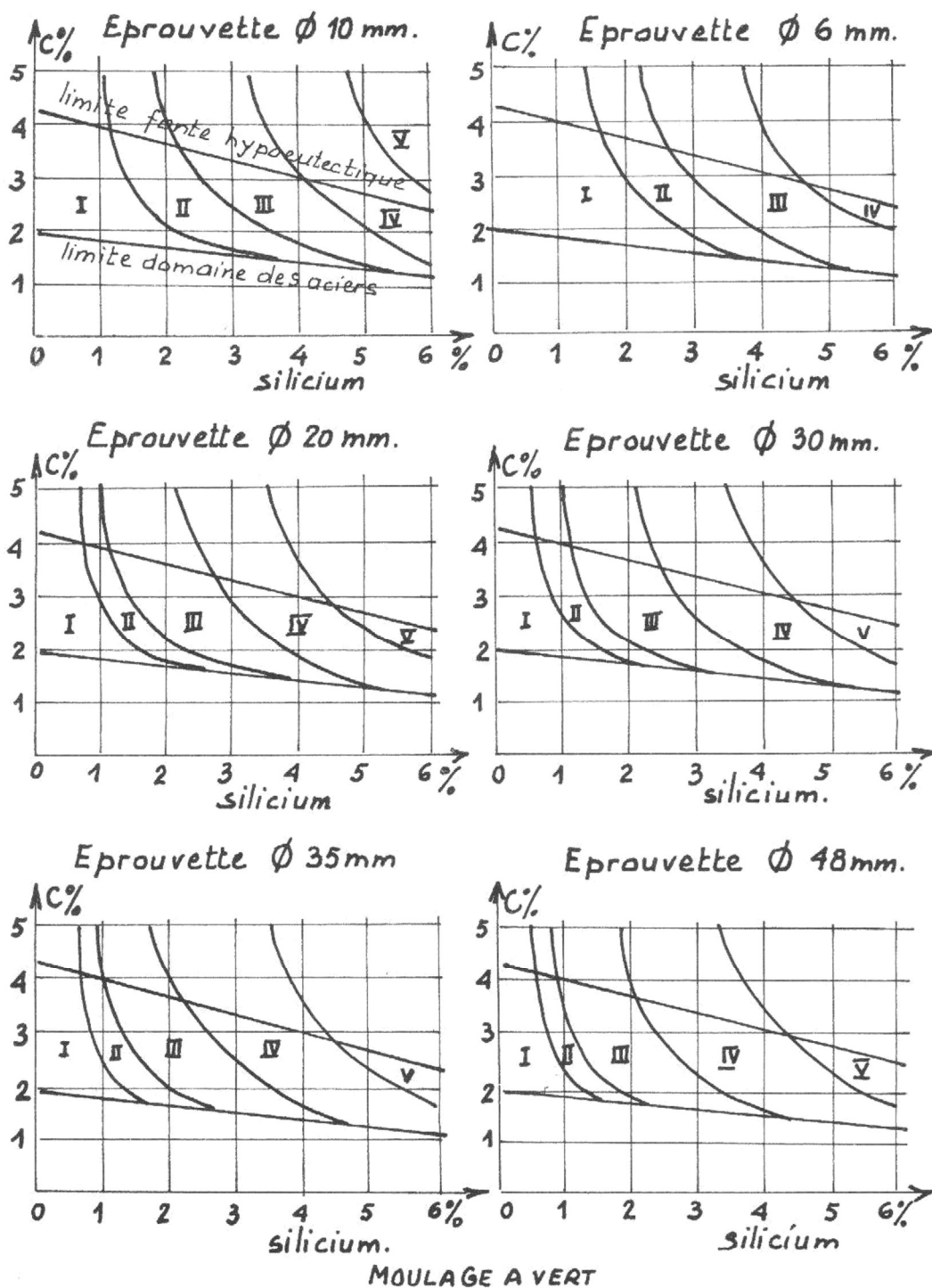
Comparaison possible	Godet Tellure (Fonte grise : grey cast iron)
%C théo	calcul par rapport au lit de fusion
%C exp	$\%C = - 6.51 - 0.0084 \cdot TL + 0.0178 \cdot TS$
%Si théo	calcul par rapport au lit de fusion
%Si exp	$\%Si = 78.411 - 4.28087 \cdot Si\text{-}adj. - 0.06831 \cdot TS$

Figure A24 - Détermination de la composition chimique – Godet Tellure (Siadj = 0.02)

Comparaison possible	Godet Tellure + Soufre (Fonte grise : grey cast iron)
%C théo	calcul par rapport au lit de fusion
%C exp	$\%C = - 6.51 - 0.0084 \cdot TL + 0.0178 \cdot TS$
%Si théo	calcul par rapport au lit de fusion
%Si exp	$\%Si = 78.411 - 4.28087 \cdot Si\text{-}adj. - 0.06831 \cdot (TS + 2.5)$

Figure A25 - Détermination de la composition chimique – Godet Tellure + Soufre (Siadj = 0.02)

Annexe 3 : Diagramme de Laplanche



I : Fonte blanche

II : Fonte traité

III : Fonte GS perlitique

IV : Fonte GS ferrito-perlitique

V : Fonte GS ferritique

Figure A31. Relation structure- composition – massivité de la pièce moulée
Diagramme de Laplanche

Annexe 4 : Coefficient de forme

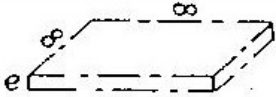
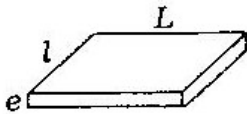
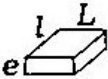
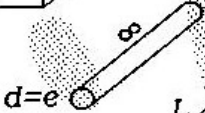
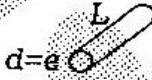
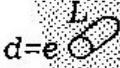
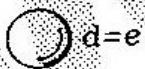
FORMES		$\omega(*)$
Plaques infinies		$L/e = l/e = \infty$ 1
Parallélépipèdes étendus		$L/e = l/e = 10$ 0,95
		$L/e = l/e = 6 \text{ à } 8$ 0,90
Barres carrées infinies (couronnes à section carrée)		$L/e = \infty$ 0,85
Parallélépipèdes peu étendus		$L/e = l/e = 4 \text{ à } 5$
Cylindres infinis (tores)		$L/e = \infty$ 0,80
Barres carrées courtes		$L/e = 2 \text{ à } 5$
Cylindres courts (**)		$L/e = 2 \text{ à } 5$
Cubes (**)		$L/e = l/e = 1$ 0,75
Cylindres très courts (**)		$L/e = 1 \text{ à } 2$
Sphères (**)		$L/e = l/e = 1$ 0,72
(*) Ces valeurs moyennes sont données à titre de repères de classement ; on peut néanmoins admettre leur exactitude à $\pm 3 \%$ près, pour des applications à l'échelle industrielle. (**) Ces corps sont rarement coulés en fonderie sans modification partielle de leur forme (adjonction d'une masselotte par exemple).		

Figure A41. Module thermique - Coefficient de forme ω

Annexe 5 : Extrait de la norme NF ISO 945-1 : 2019

Lors de l'examen des fontes au microscope, conformément au présent document, le graphite doit être classé par ce qui suit :

- a. **sa forme**, désignée par les chiffres romains I à VI (voir Figure A51) ;
- b. **sa répartition**, désignée par les lettres majuscules A à E, (voir Figure A52) ; la désignation de la répartition du graphite est spécifiée uniquement pour les fontes à graphite lamellaire (forme I) ;
- c. **sa taille**, désignée par les chiffres 1 à 8 (voir Figures A53, A54 et A55).

NOTE : Les Figures A51 à A55 ne montrent que les contours des particules de graphite, et non leur structure.

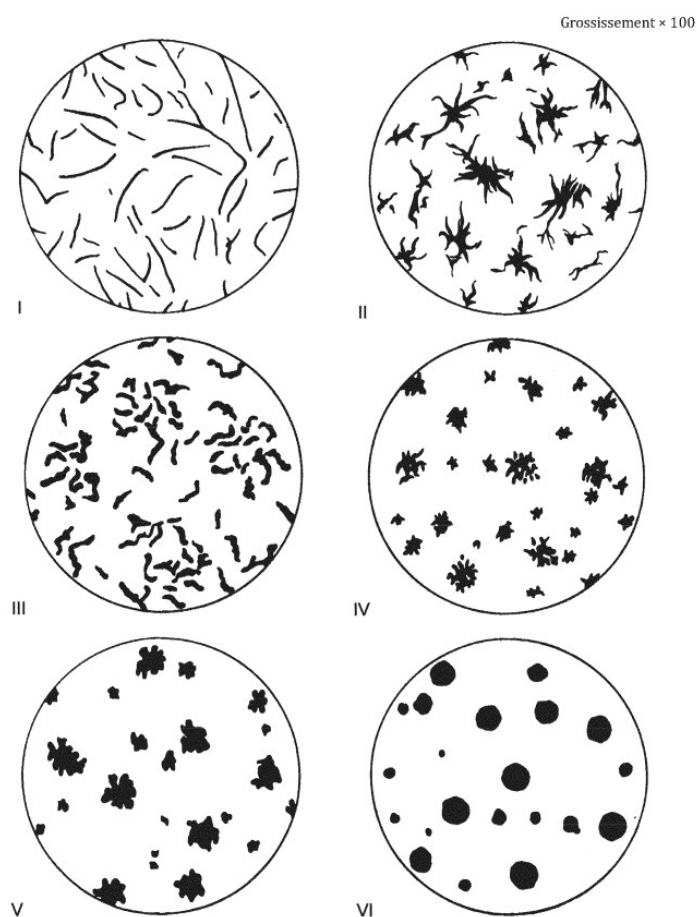


Figure A51 – Différentes formes du graphite

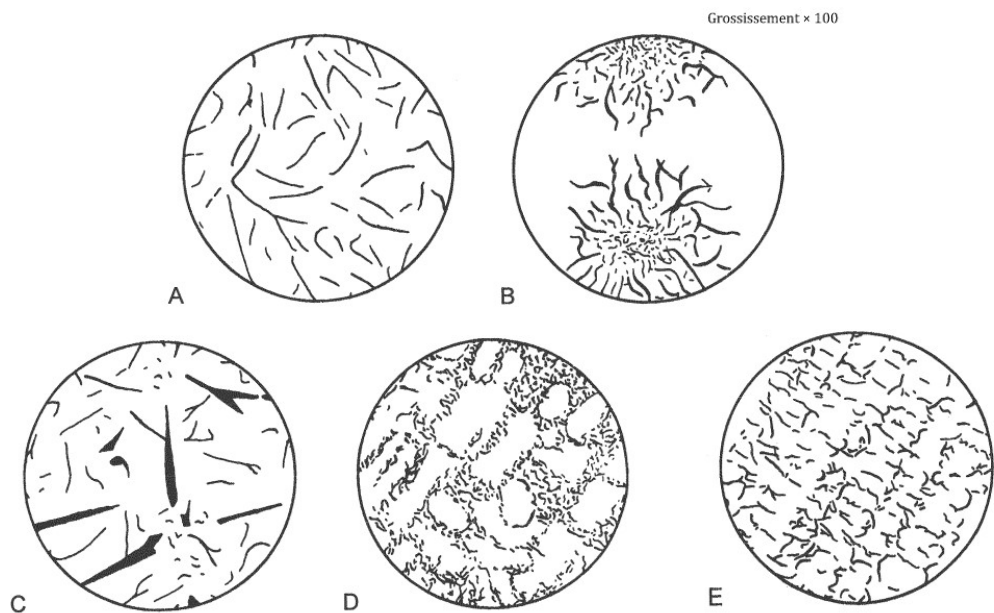


Figure A52 – Répartition du graphite

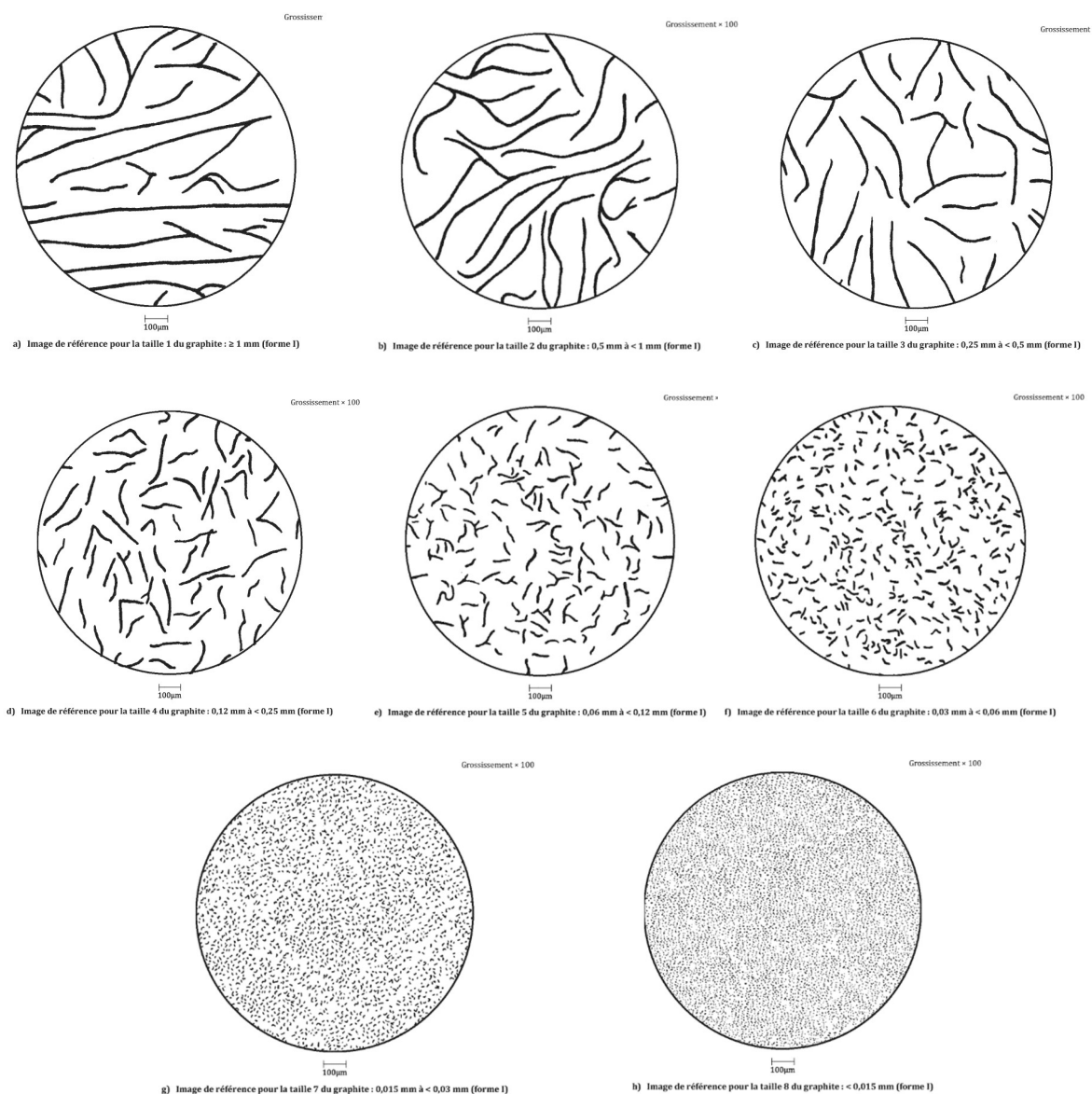


Figure A53 – Taille du graphite de forme I

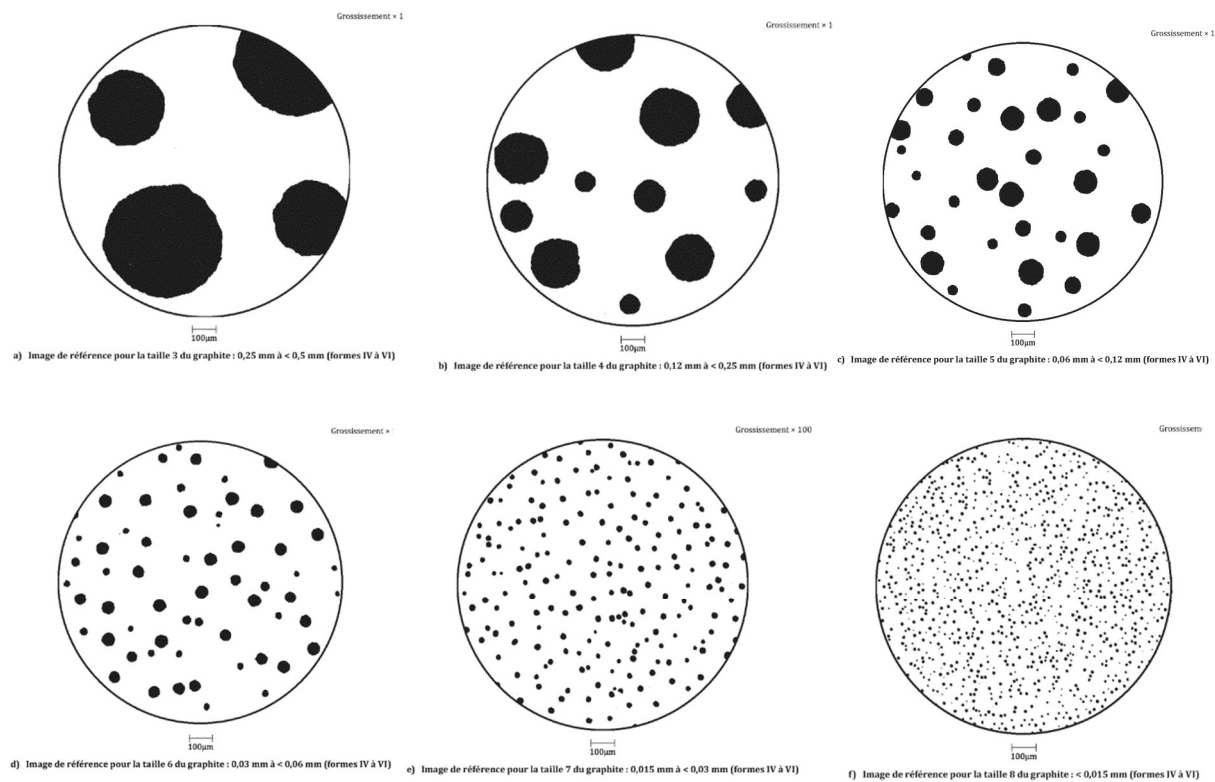


Figure A54 – Taille du graphite de forme IV et V