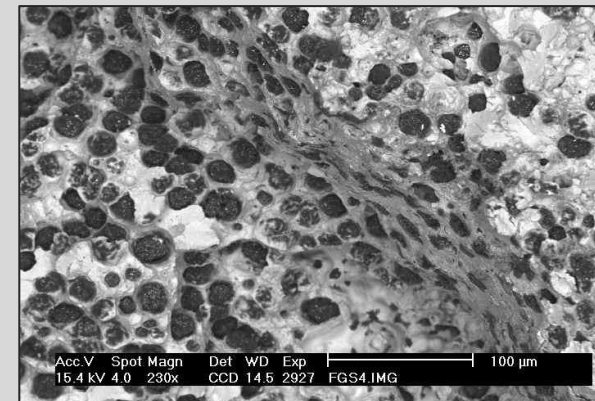
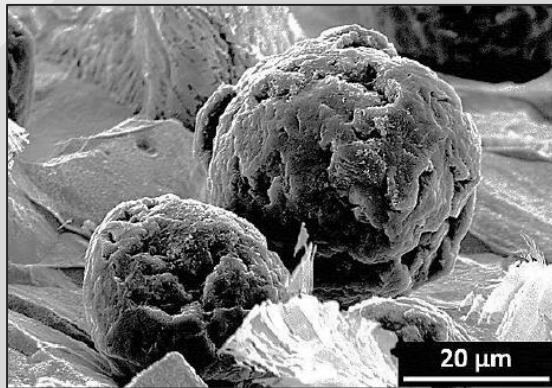


Interaction Matériau / Procédé

Fonderie

UEI Concevoir – 2nd année



Recyclage et élaboration des fontes

Cas d'étude : Elaboration d'une fonte GS et son suivi de production



Aude CAILLAUD



Arts
et Métiers
Sciences et
Technologies



Séquence GIM2 – UEI Concevoir

Séquence Conception et Génération de surfaces complexes

3 ED de 4h00

1 ED de 4h00
1 ED de 1h20
2 TP de 4h00
2 ED de 1h20
1 TP de 4h00
1 Test de 1h20

Coefficient 2

Séquence Simulation Numérique des PRCD

1 ED de 1h20
1 ED de 2h40
3 TP de 4h00
1 Test de 1h20

Coefficient 1

Séquence Analyse d'impact Procédé / Matériau

Déf. Plastique

1 ED de 2h40
1 ED de 1h20
2 TP de 4h00

Fonderie

1 ED de 2h40
1 ED de 1h20
2 TP de 4h00

Analyse du cycle de vie

3 ED de 1h20

1 Test de 1h20

Coefficient 2

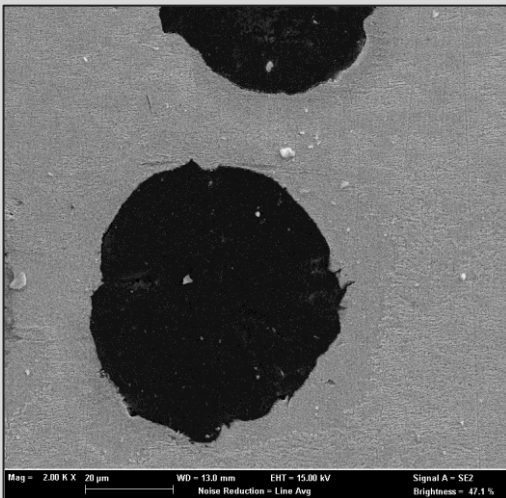


Séquence pédagogique

Semestre GIM2

UEI Concevoir

- Interactions Matériau / Procédé
 - Fonderie



2h40 ED Recyclage et Elaboration des fontes
4h00 TP Elaboration Fonte GS

1h20 ED Traitements alliages d'aluminium
4h00 TP Traitements alliages d'aluminium

1h20 Test



Objectifs

Les **objectifs de la séquence** sur l'élaboration des fontes GS sont les suivants :

- 1 Comprendre les **mécanismes physiques** qui permettent d'élaborer des fontes à partir de matériaux neufs ou recyclés (ED1)
- 2 Effectuer un **calcul de charges** (ED2)
- 3 **Instrumenter** un process de production (TP)
- 4 Effectuer un **suivi de production** en s'appuyant sur l'instrumentation (TP) :
 - analyse thermique
 - analyse spectrométrique
- 5 Tester votre capacité à **prendre des décisions** rapidement (TP)



Plan de la présentation

1

Intérêts des différentes familles de fontes

2

Elaboration d'une fonte grise

3

Détermination compo chimique

4

Calcul de chargement

5

Contrôle des fontes



Plan de la présentation

1

Intérêts des différentes familles de fontes

2

Elaboration d'une fonte grise

3

Détermination compo chimique

4

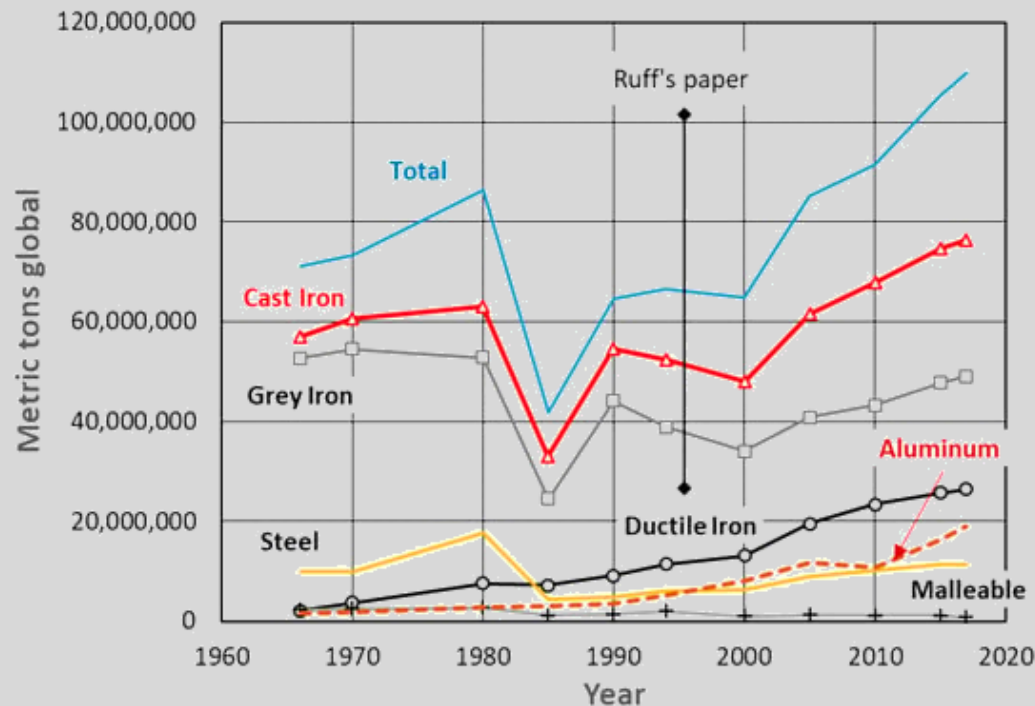
Calcul de chargement

5

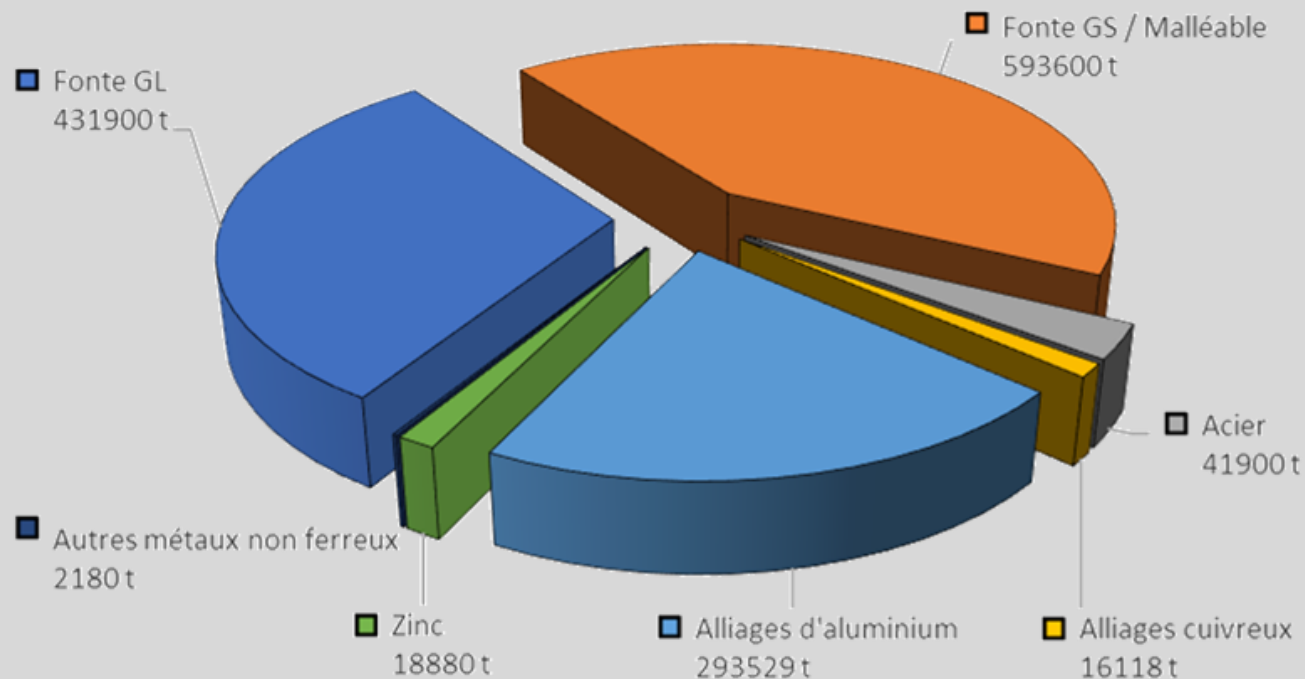
Contrôle des fontes



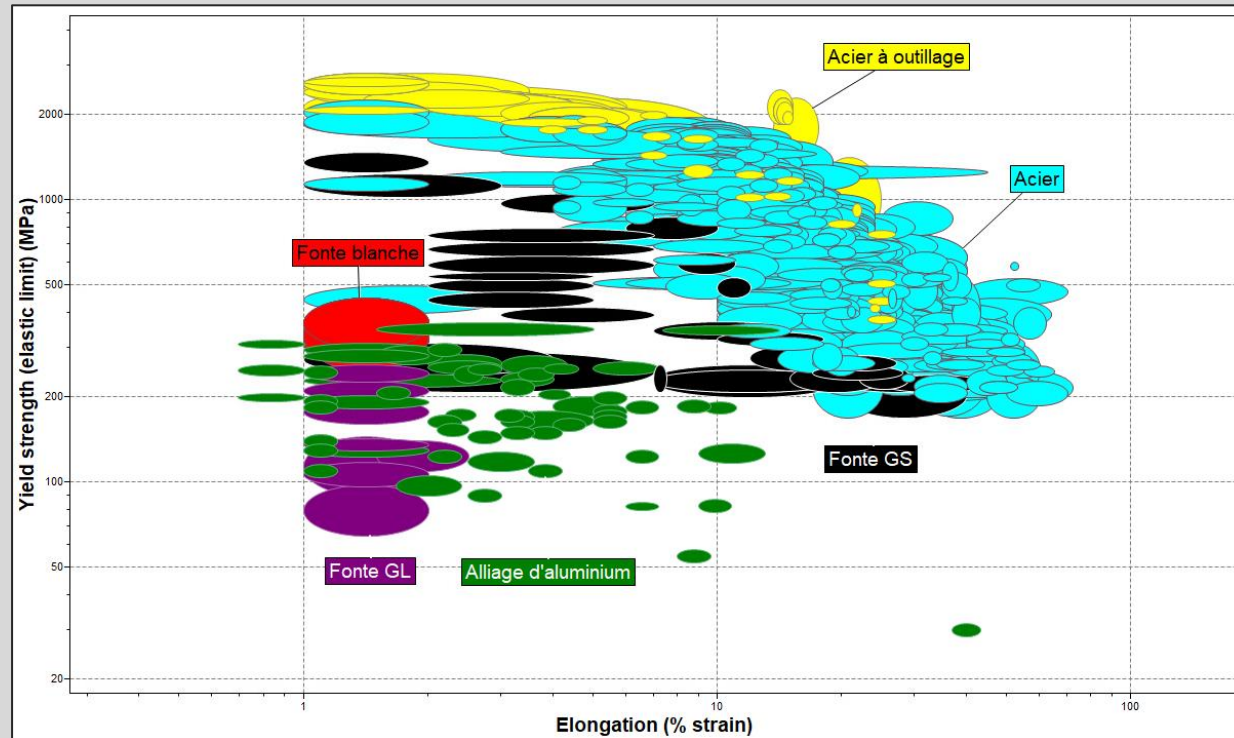
- Fonte GS : **Croissance continue** depuis sa découverte (facteur 11 depuis 1966)
 - ➡ Grand panel de propriétés mécaniques
 - ➡ Coût de production compétitif



- Fonte GS : **nuance la plus produite** en France (tonnage)
 - ➡ 42% du tonnage de pièces produites en France
 - ➡ Seulement 2 à 3% de la production mondiale

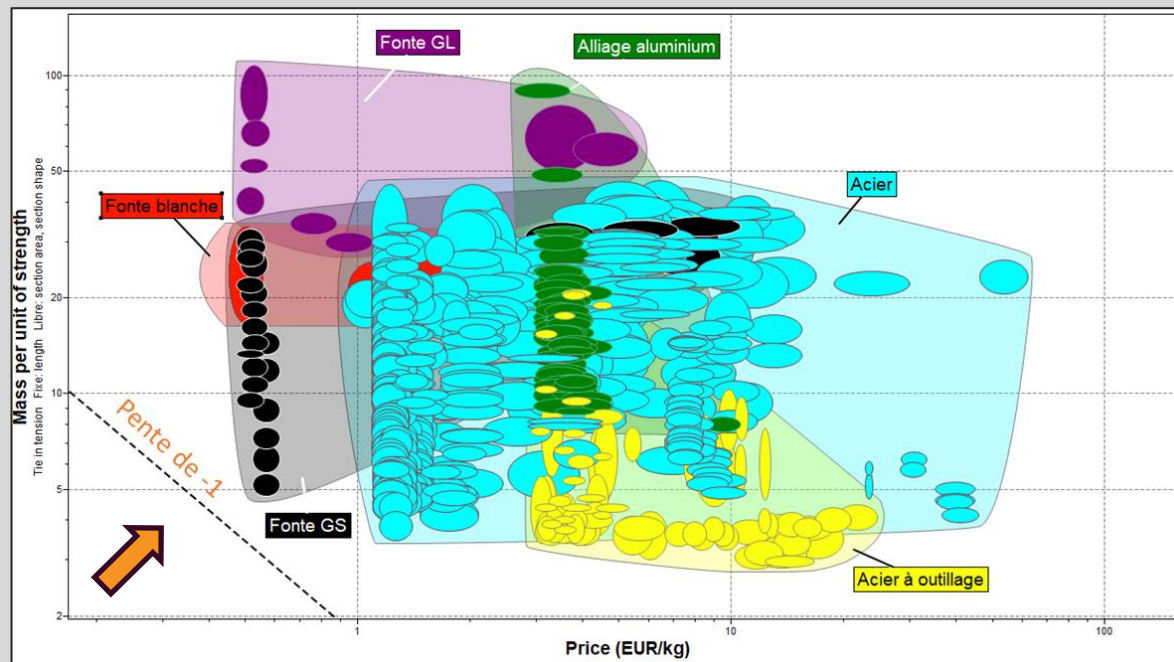


- Bilan **technique** : un des premiers critères étudiés par les fondeurs
 - ➔ Caractéristiques mécaniques tendent vers celles des **aciers**
 - ➔ Réponse à un **besoin intermédiaire** entre les fontes CL et aciers



- Bilan **économique** : les fontes GS imbattables sur ce critère

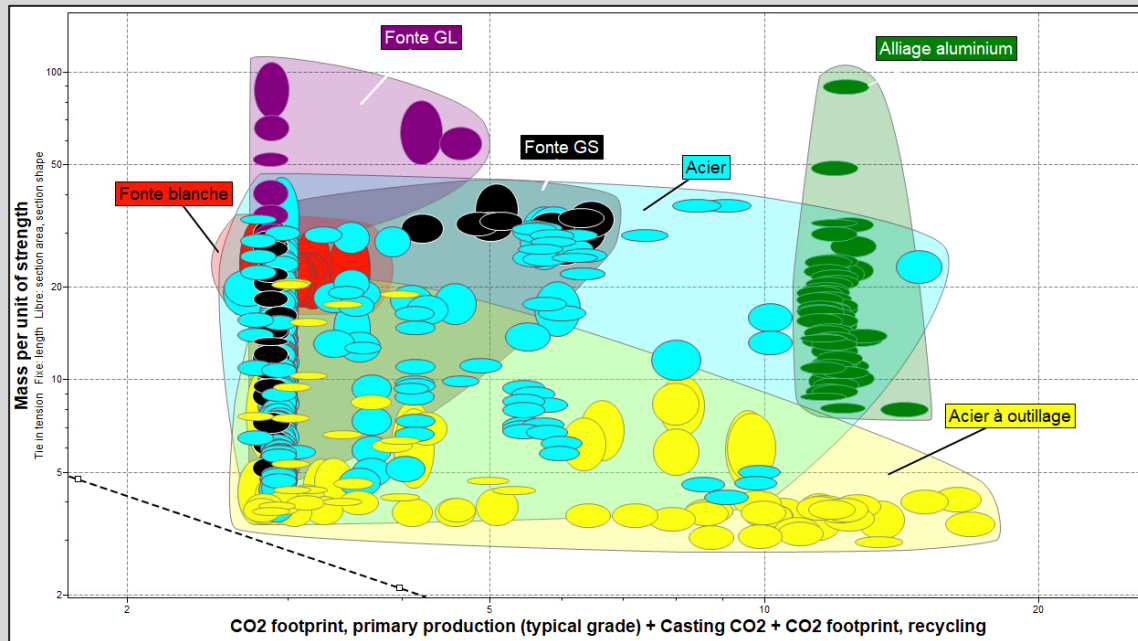
➔ Sur chaque droite de pente -1 : tous les matériaux qui, à isocoût, permettent de résister à un effort de traction de 1N (par unité de longueur).



NB : Même conclusion pour résistance en compression et en flexion

- Bilan **environnemental** : CO₂ équivalent sur le cycle de vie

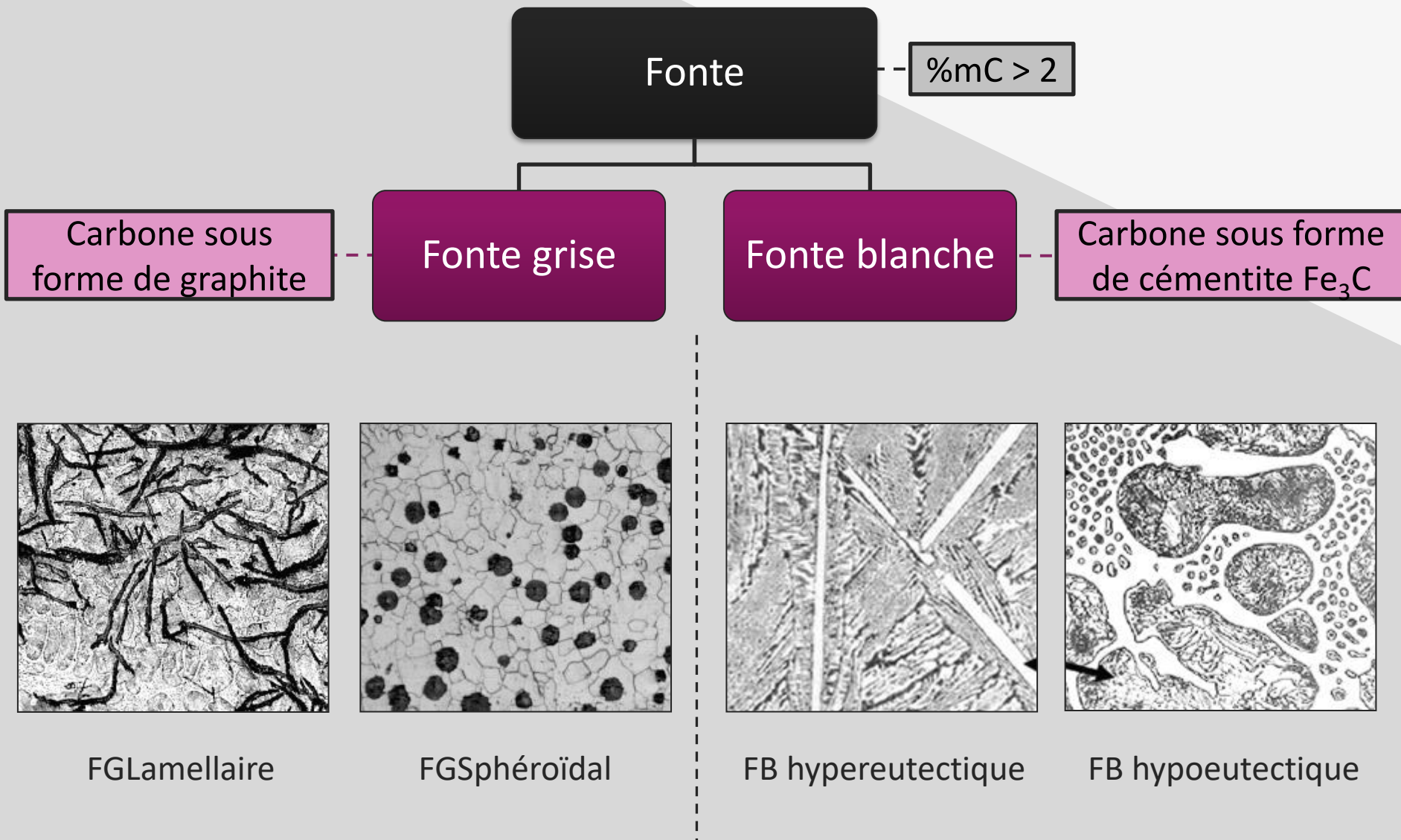
➔ Sur chaque droite de pente -1 : tous les matériaux qui, à iso CO₂ équivalent, permettent de résister à un effort de traction de 1N (par unité de longueur).



Analyse du Cycle de Vie :

- Obtention de la Matière 1^{ère}
- Mise en forme du produit
- Recyclage

Comparatif Fonte blanche / Fonte grise



Fonte grise = présence de graphite

■ Propriétés du graphite :

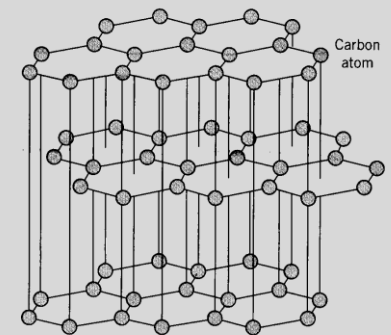


Inconvénients

- Masse volumique faible
 - Masse volumique γ : 8679 kg/m^3
 - Masse volumique graphite : 2250 kg/m^3
- Mauvaise résilience
- Dureté faible
- Aucune résistance mécanique (décomposition en feuillets minces)

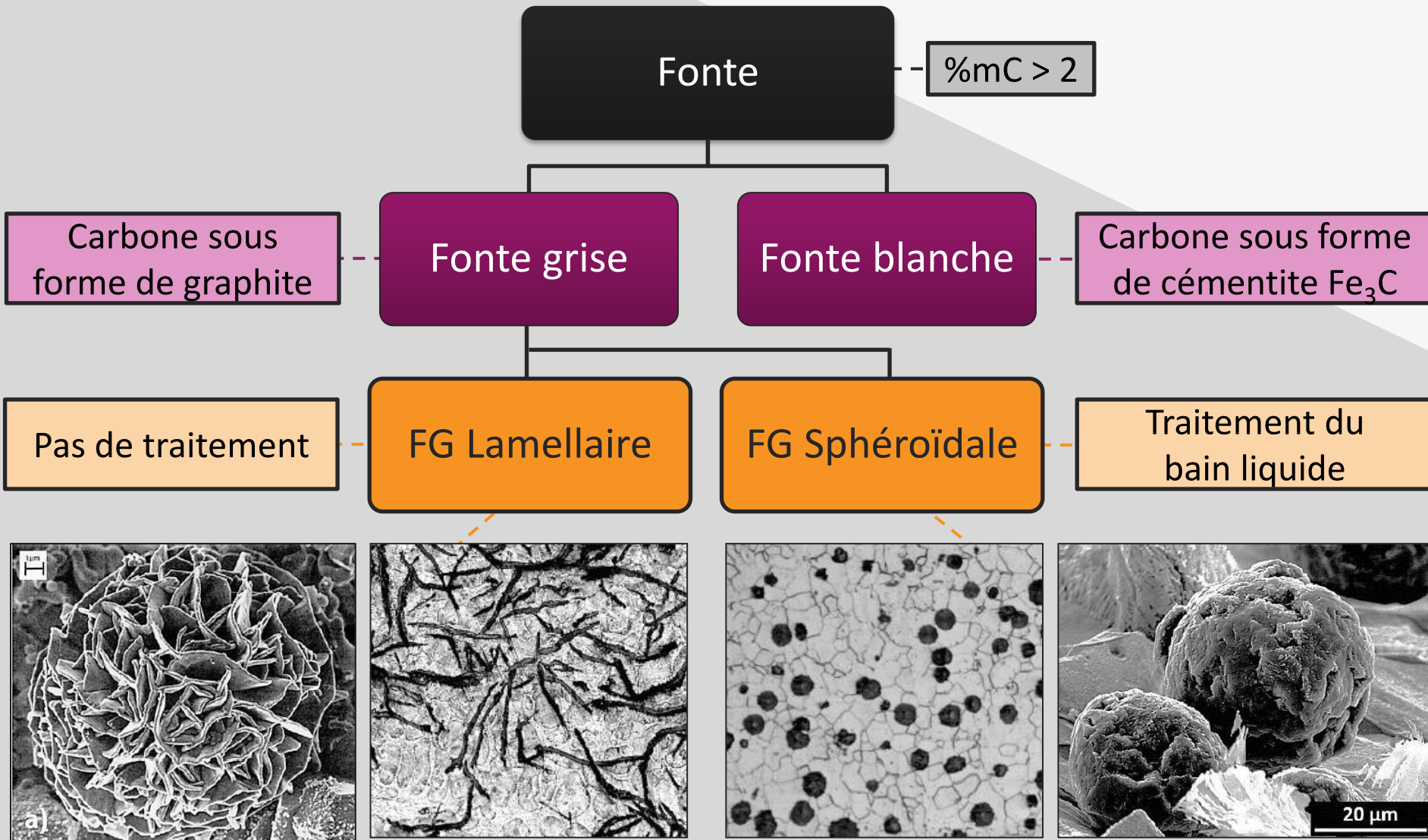
Avantages

- Capacité d'amortissement importante
- Auto-lubrifiant



Le graphite est assimilable à du vide

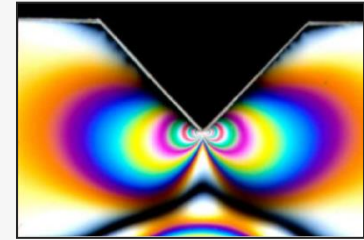
Les grandes familles de fontes



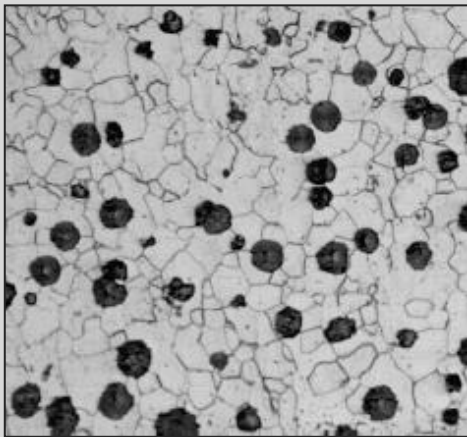
Comparatif Fonte Grise Lamellaire / Sphéroïdale

- Importance de la **forme du graphite** :

$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma_{\text{nom}}$$



car le graphite peut être assimilé à du vide



Fonte GS



Fonte GL



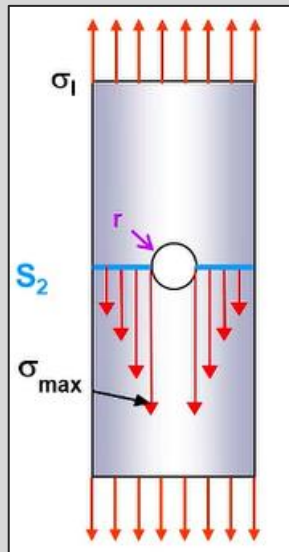
La structure du graphite peut accentuer ou diminuer **l'effet d'entaille** (sensibilité à la fissuration)

Comparatif Fonte Grise Lamellaire / Sphéroïdale

- Importance de la **forme du graphite** :

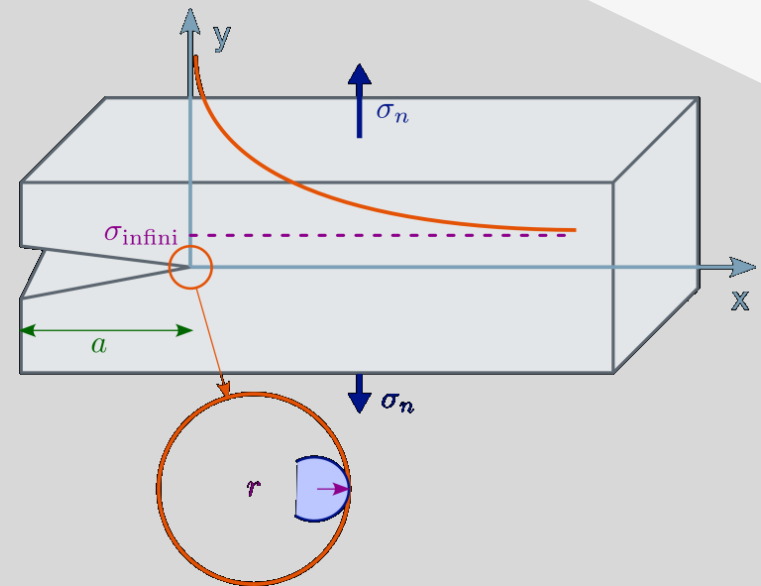
$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma_{\text{nom}}$$

Cas d'une sphère (FGS)



$$K_t \approx 2 \text{ (FGS)}$$

En fond d'entaille (FGL)

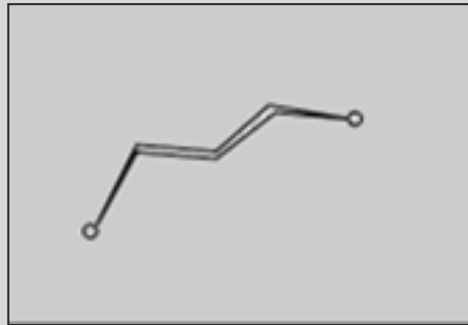


$$K_t = \sqrt{a/r}$$

Comparatif Fonte Grise Lamellaire / Sphéroïdale

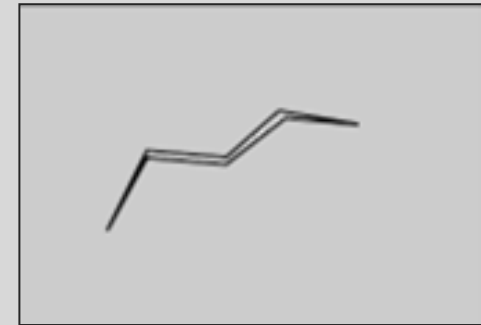
- Solution pour arrêter la propagation d'une fissure

Cas d'une sphère



$$K_t \approx 2 \text{ (FGS)}$$

En fond d'entaille



$$K_t = \sqrt{a/r}$$

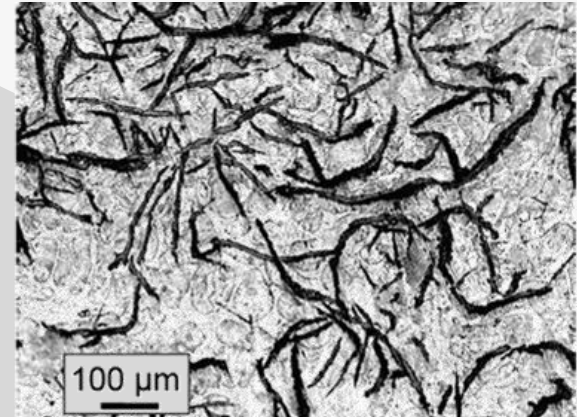
Bilan Fonte Graphite Lamellaire (FGL)

Inconvénients

Fragilité : effet d'entaille

Faible **A%** (0.5 à 1%)

Faible **Rm** (150 à 400 MPa)



Source : LE Masse, Arts et Métiers ParisTech

Lamelles sans orientation préférentielle

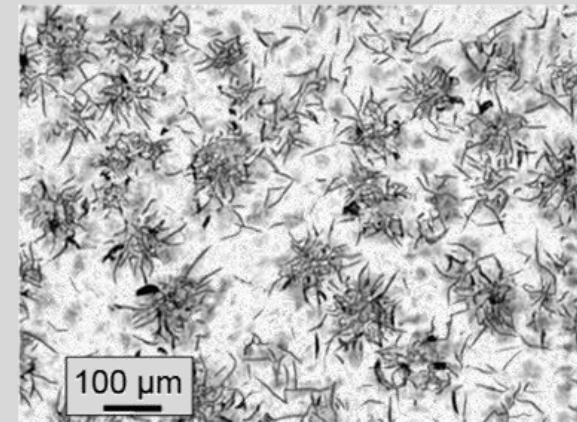
Avantages

Usinabilité

Coût : pas de traitement

Résistance **corrosion**

Coulabilité



Source : LE Masse, Arts et Métiers ParisTech

Graphite en rosettes

■ Utilisations:

Pompe, vanne, carters-cylindres, contrepoids, inserts de cheminée, bâtis de MO ...

1

Intérêts des différentes familles de fontes



Arts et Métiers
Sciences et Technologies



Bilan Fonte Graphite Sphéroïdale (FGS)

Inconvénients

Traitement du bain liquide

Coût du traitement

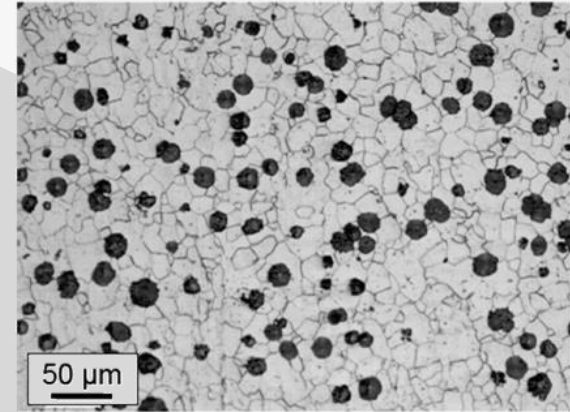
Avantages

Ductilité

$1 < A\% < 20$

Comportement à la fatigue

$400 \text{ MPa} < R_m \text{ traction} < 800 \text{ Mpa}$



Fonte GS à matrice ferritique



Une FGS permet de se rapprocher
des caractéristiques des aciers

■ Utilisations:

Pièces de sécurité ou fortement sollicitées : vilebrequins de moteur, bras de suspensions de véhicule (fatigue), bloc moteur, disque de frein...

1

Intérêts des différentes familles de fontes



Arts
et Métiers
Sciences et
Technologies



Importance de la nature de la matrice

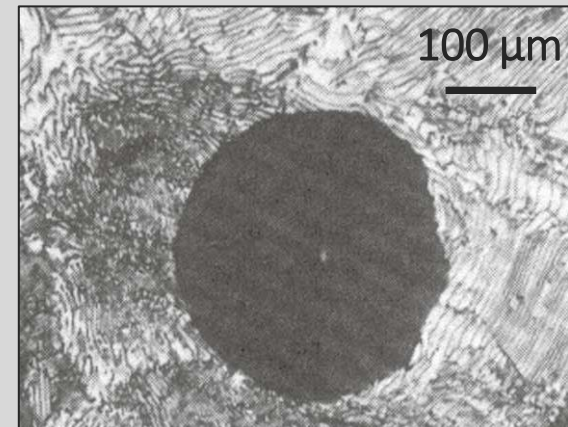
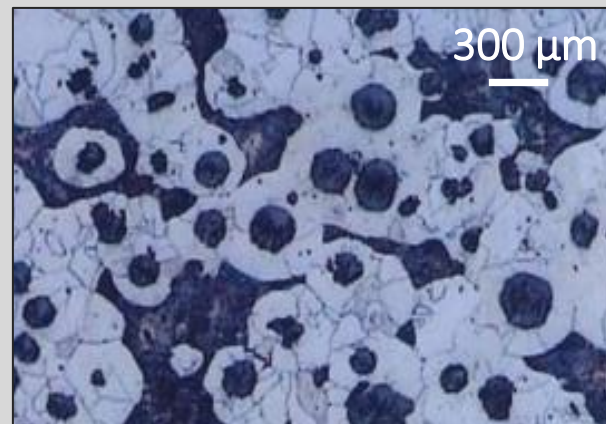
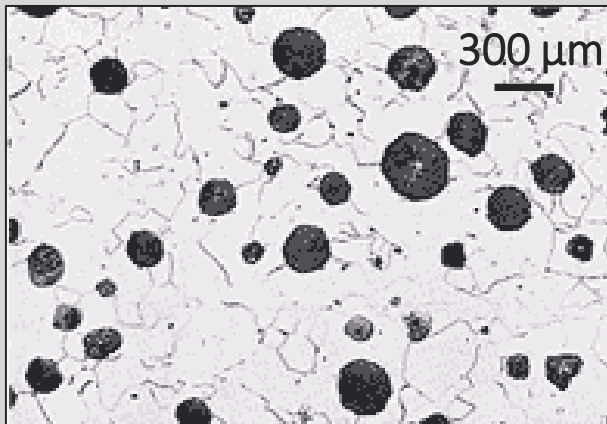
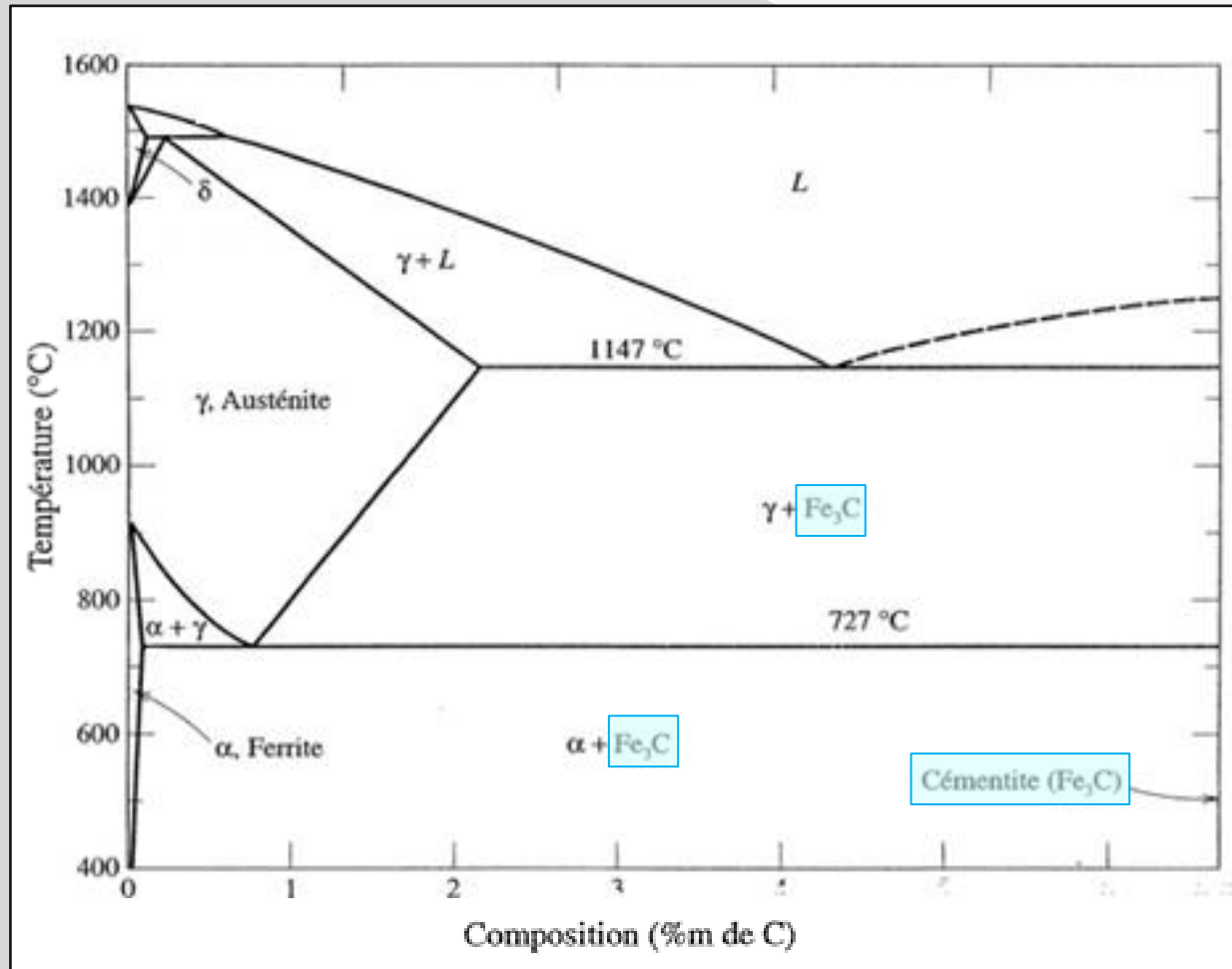


Diagramme d'équilibre métastable Fe - C

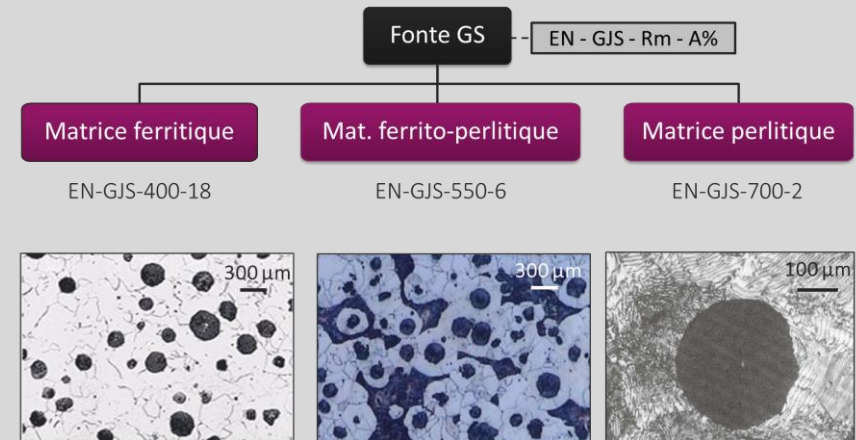
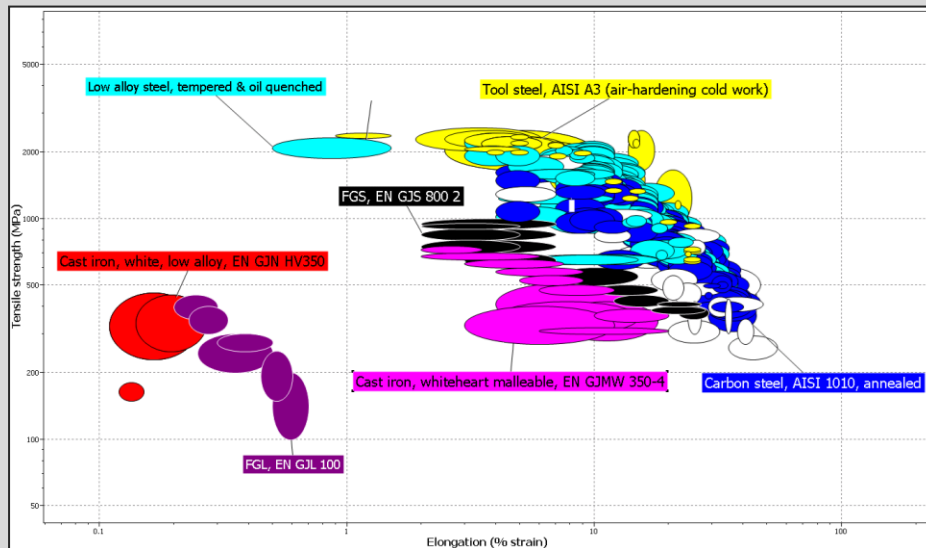


Bilan : comment choisir la fonte à élaborer ?

Le choix :

- du type de fonte : blanche, GL ou GS ...
- de la nature de la matrice : ferritique, perlitique ...

... s'effectue en fonction du **cahier des charges** du client



Plan de la présentation

1

Intérêts des différentes familles de fontes

2

Elaboration d'une fonte grise

3

Détermination compo chimique

4

Calcul de chargement

5

Contrôle des fontes

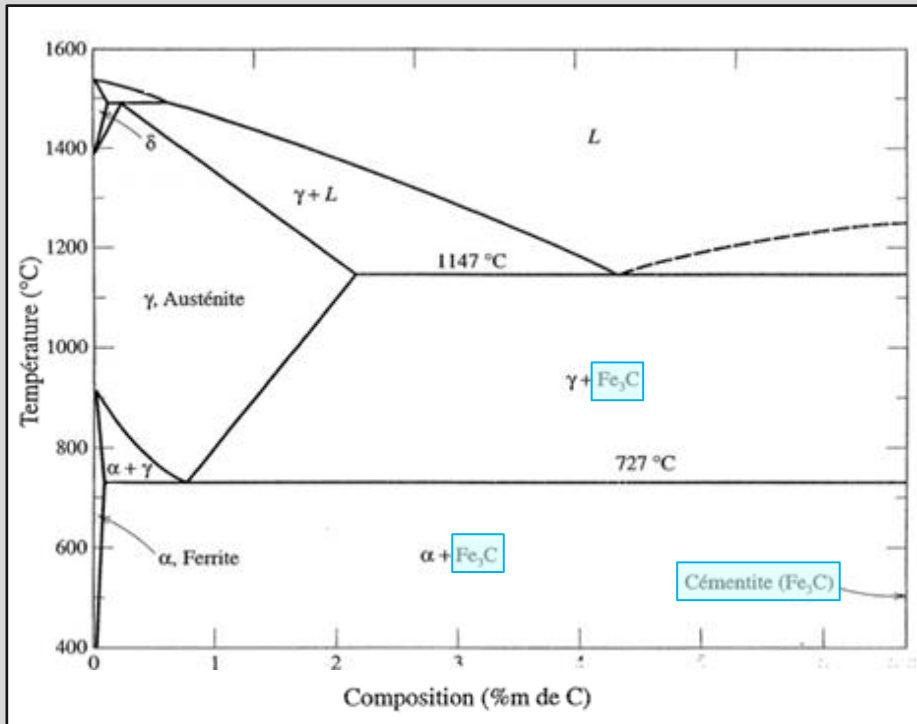


Deux diagrammes de phases

1 Diagramme d'équilibre **métastable**

Fonte blanche

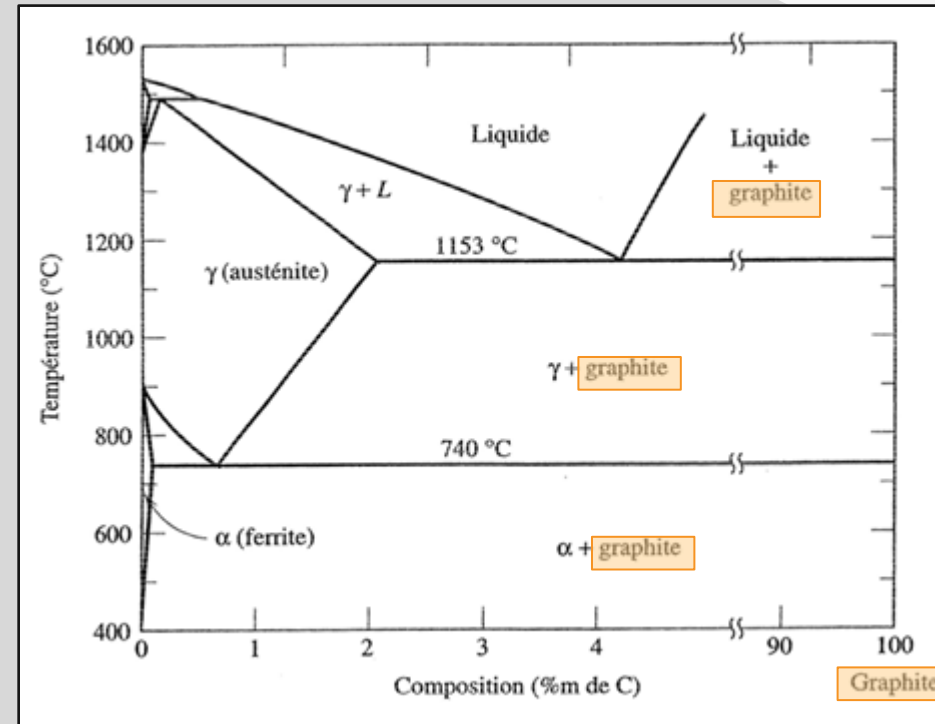
C sous forme de cémentite Fe_3C



2 Diagramme d'équilibre **stable**

Fonte grise

C sous forme de graphite



2

Elaboration d'une fonte grise



Arts et Métiers
Sciences et Technologies



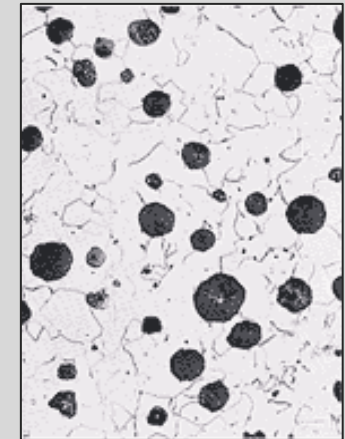
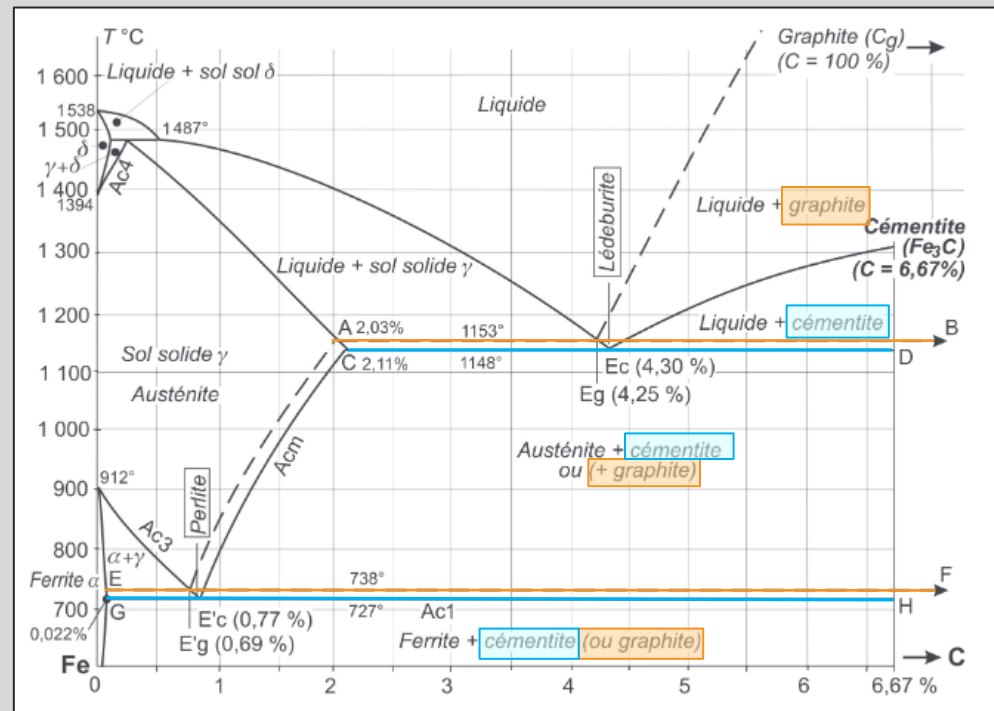
Comment faire une Fonte Grise ?

1) Diagramme d'équilibre métastable

- Vitesse refroidissement rapide
- Éléments carburigènes (W, Te ...)

2) Diagramme d'équilibre **stable**

- Vitesse refroidissement lente
- Éléments graphitisants (Si ...)



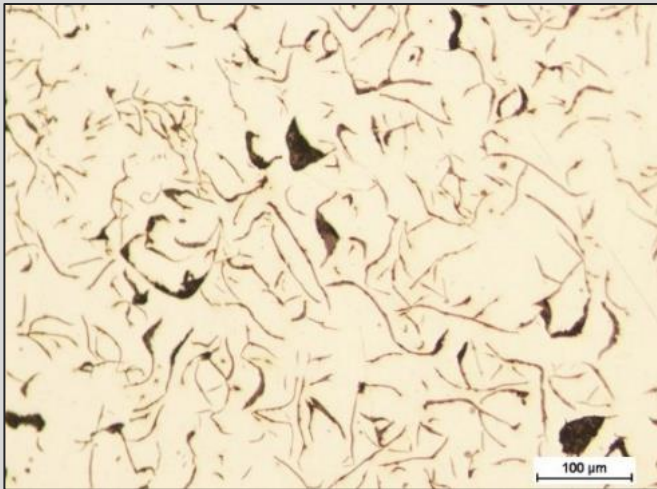
FGS

2 Elaboration d'une fonte grise

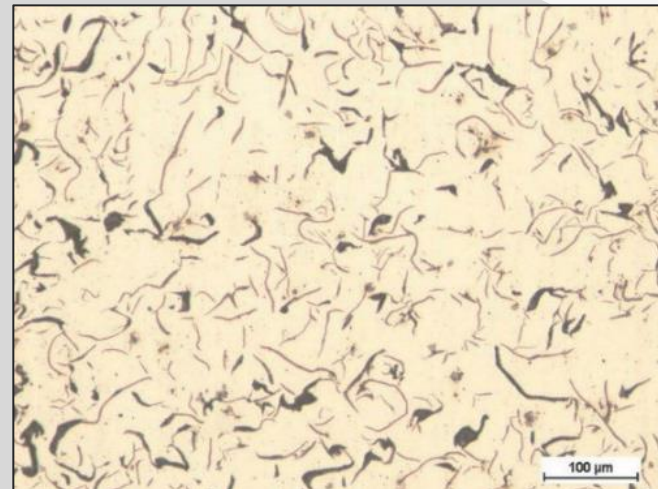
Comment faire une Fonte Grise Sphéroïdale ?

1 Traitement 1 : Inoculation au ferro-silicium

- Action 1 : augmentation du nombre de sites de germination



FGL à matrice ferritique (X70)
Non inoculée



FGL à matrice ferritique (X70)
Inoculée

- Action 2 : L'inoculant contient du silicium (élément graphitisant), ce qui permet d'éviter la formation de carbures.

Comment faire une Fonte Grise Sphéroïdale ?

1

Traitement 2 : Sphéroïdisation au ferro-silico-magnésium



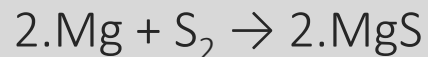
- **Action** : Ajout de magnésium (Mg) dans le bain de fusion qui modifie la **tension superficielle** du graphite dans la fonte, d'où l'obtention d'une forme sphéroïdale [hypothèse de LAP76]

- **Techniques de traitement** :

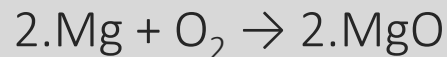
- Dans la poche (cf. vidéo 1)
- Au fil fourré (cf. vidéo 2)



- **Précautions d'utilisation** : Le magnésium est **avide de soufre et d'oxygène**



Création de sulfure



Création d'oxyde

2

Elaboration d'une fonte grise



Arts
et Métiers

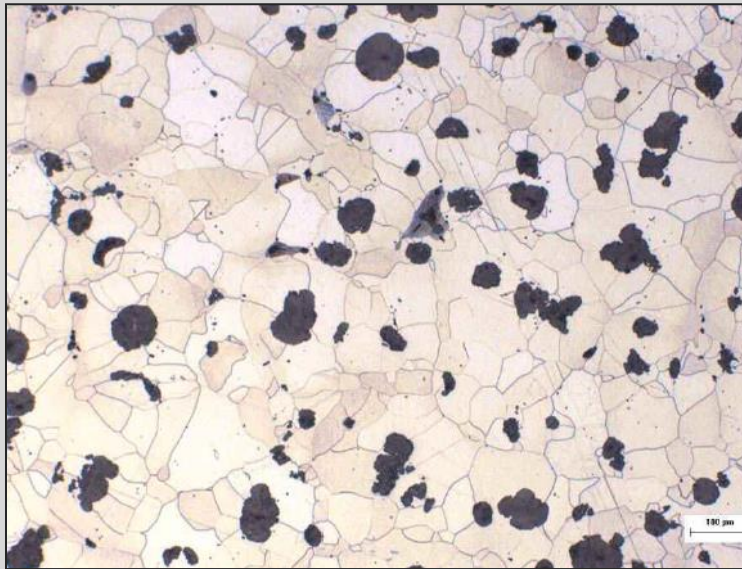
Sciences et
Technologies



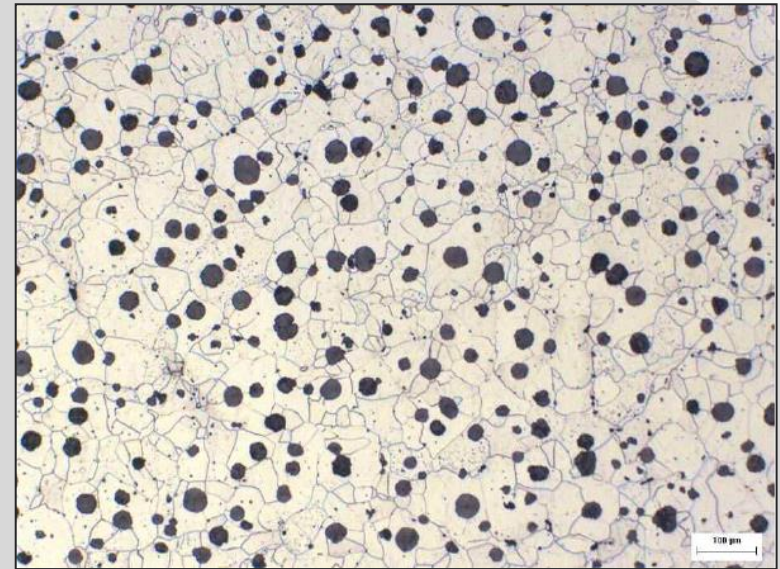
Comment faire une Fonte Grise Sphéroïdale ?

Dans la vraie vie :

- Traitement d'inoculation + Traitement de sphéroïdisation



FGS à matrice ferritique (X70)
Non inoculée



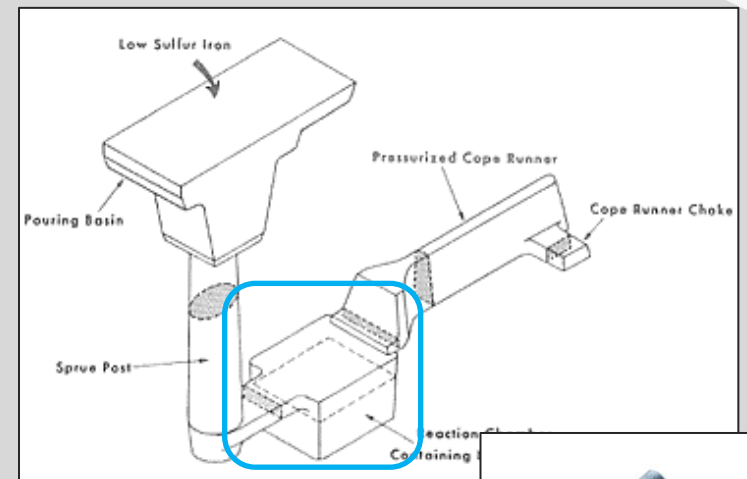
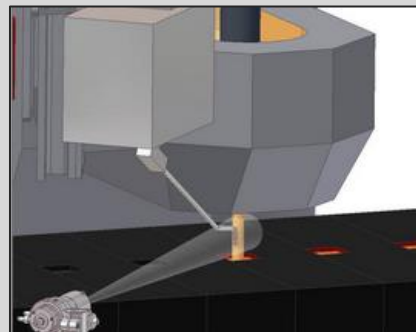
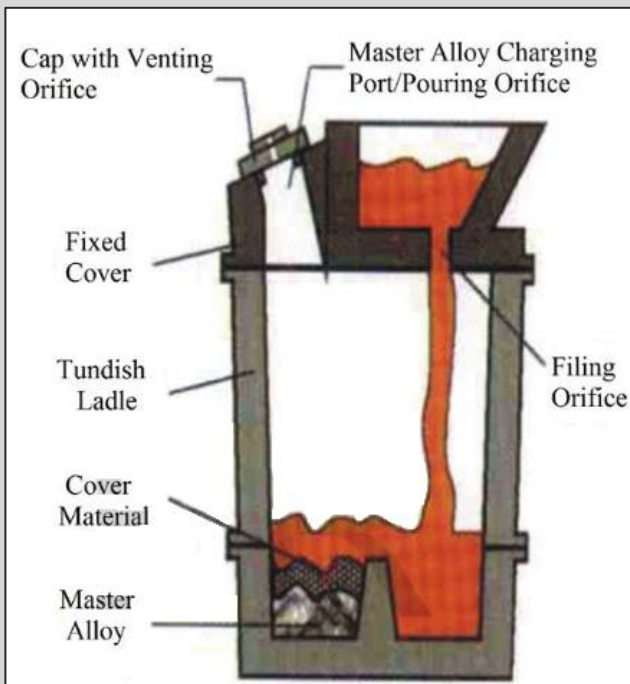
FGS à matrice ferritique (X70)
Inoculée

Comment faire une Fonte Grise Sphéroïdale ?

1 Traitement 1 : Inoculation au ferro-silicium

■ Techniques d'inoculation

- Dans la poche
- Au jet
- In mold (tardive)



2

Elaboration d'une fonte grise



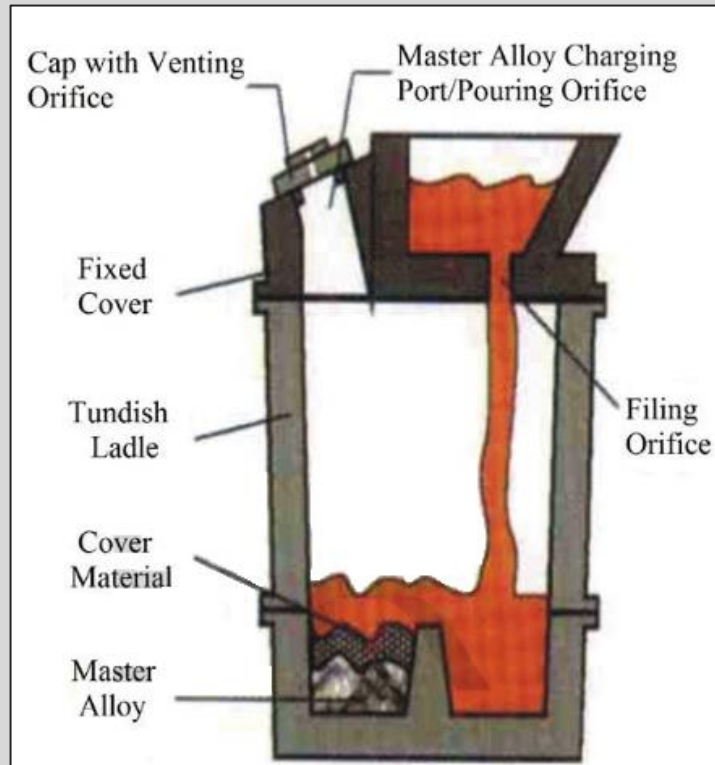
Arts et Métiers
Sciences et Technologies



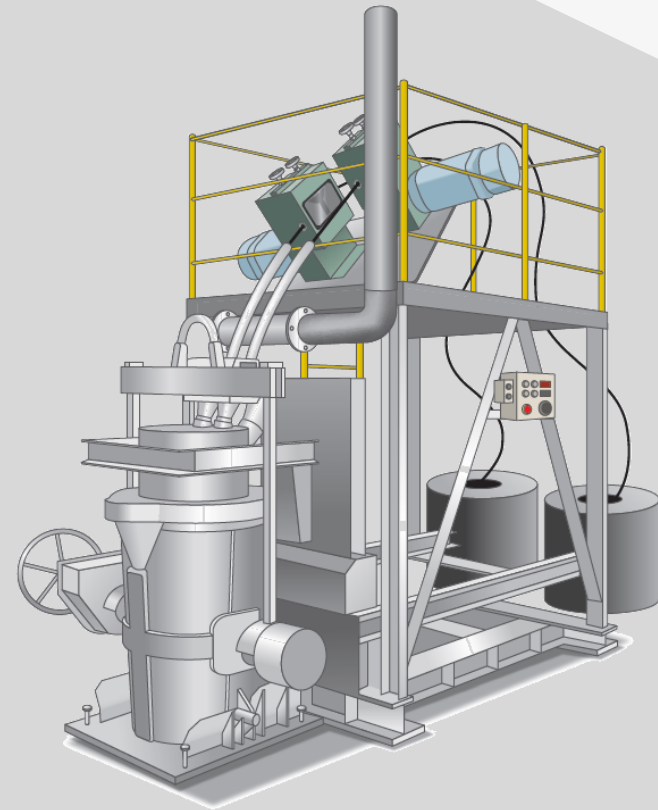
Comment faire une Fonte Grise Sphéroïdale ?

2 Traitement 2 : Sphéroïdisation au FeSiMg

Méthode Poche



Méthode fil fourré



Méthode utilisée durant le TP

Méthode Poche



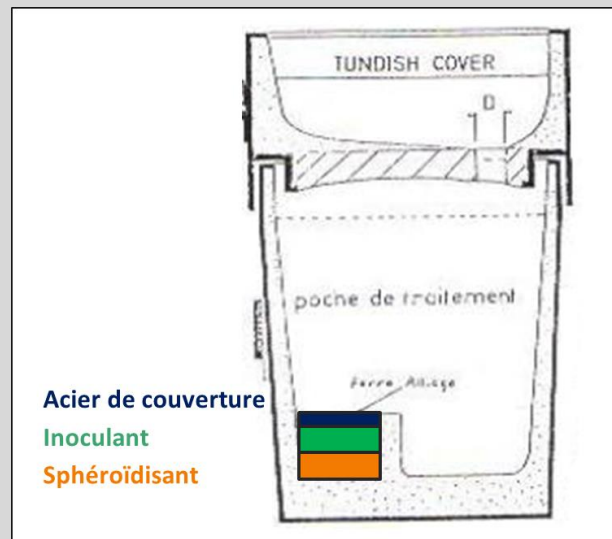
Méthode fil fourré



Méthode utilisée durant le TP

Méthode Tundish Cover

- Introduction des deux traitements dans le fond de la poche
- Fermeture du couvercle
- Transvasement de la fonte du four de fusion vers la poche de traitement



Plan de la présentation

1

Intérêts des différentes familles de fontes

2

Elaboration d'une fonte grise

3

Détermination compo chimique

4

Calcul de chargement

5

Contrôle des fontes



Importance de la nature de la matrice

- Quelles sont les paramètres influents sur la microstructure obtenue?
 - La composition chimique de l'alliage
 - %m de Carbone
 - %m de Silicium
 - La vitesse de refroidissement de la pièce :

$$M_t = \omega \cdot \frac{V}{S}$$

$$T_{solidification} = K \cdot \left(\omega \cdot \frac{V}{S} \right)^2$$

M_t	Module thermique
K	cte fonction propriétés thermiques
ω	coefficient de forme
V	volume de l'élément
S	surfaces refroidissantes

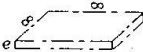
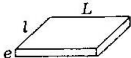
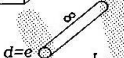
Importance de la nature de la matrice

- Exemple : détermination M_t d'un cube

$$M_t = \omega \cdot \frac{V}{S}$$

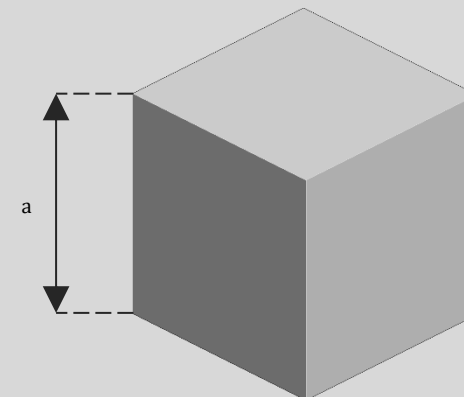
M_t Module thermique
 ω coefficient de forme (abaque)
 V volume de l'élément
 S surfaces refroidissantes

Abaque – 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		$L/e = l/e = 4 \text{ à } 5$	0,80
Cylindres infinis (tores)		$L/e = \infty$	
Barres carrées courtes		$L/e = 2 \text{ à } 5$	
Cylindres courts (**)		$L/e = 2 \text{ à } 5$	0,75
Cubes (**)		$L/e = l/e = 1$	
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).



$$V = a^3$$

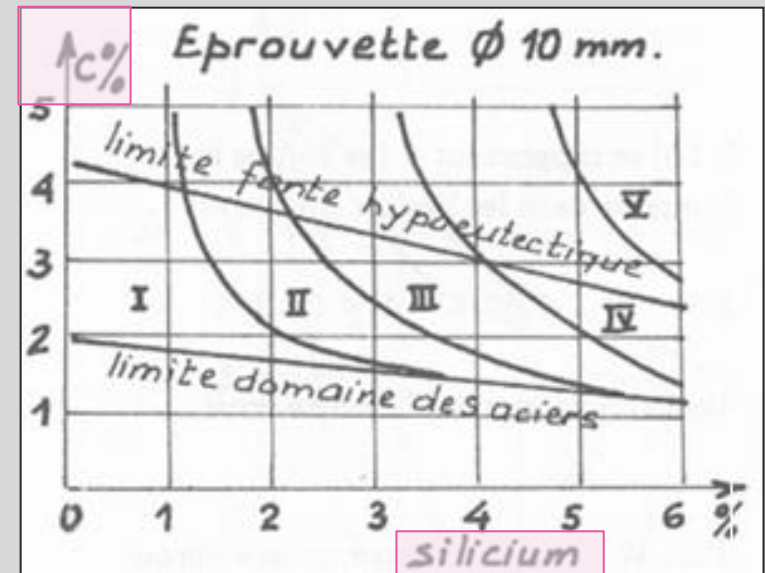
$$S = 6 \cdot a^2$$

Choix composition chimique de la fonte

- Quelles sont les paramètres influents sur la microstructure obtenue?
 - La composition chimique de l'alliage
 - %m de Carbone
 - %m de Silicium

Diagramme de Laplanche

- I : Fonte blanche
- II : Fonte traité
- III : Fonte GS perlitique
- IV : Fonte GS ferrito-perlitique
- V : Fonte GS ferritique

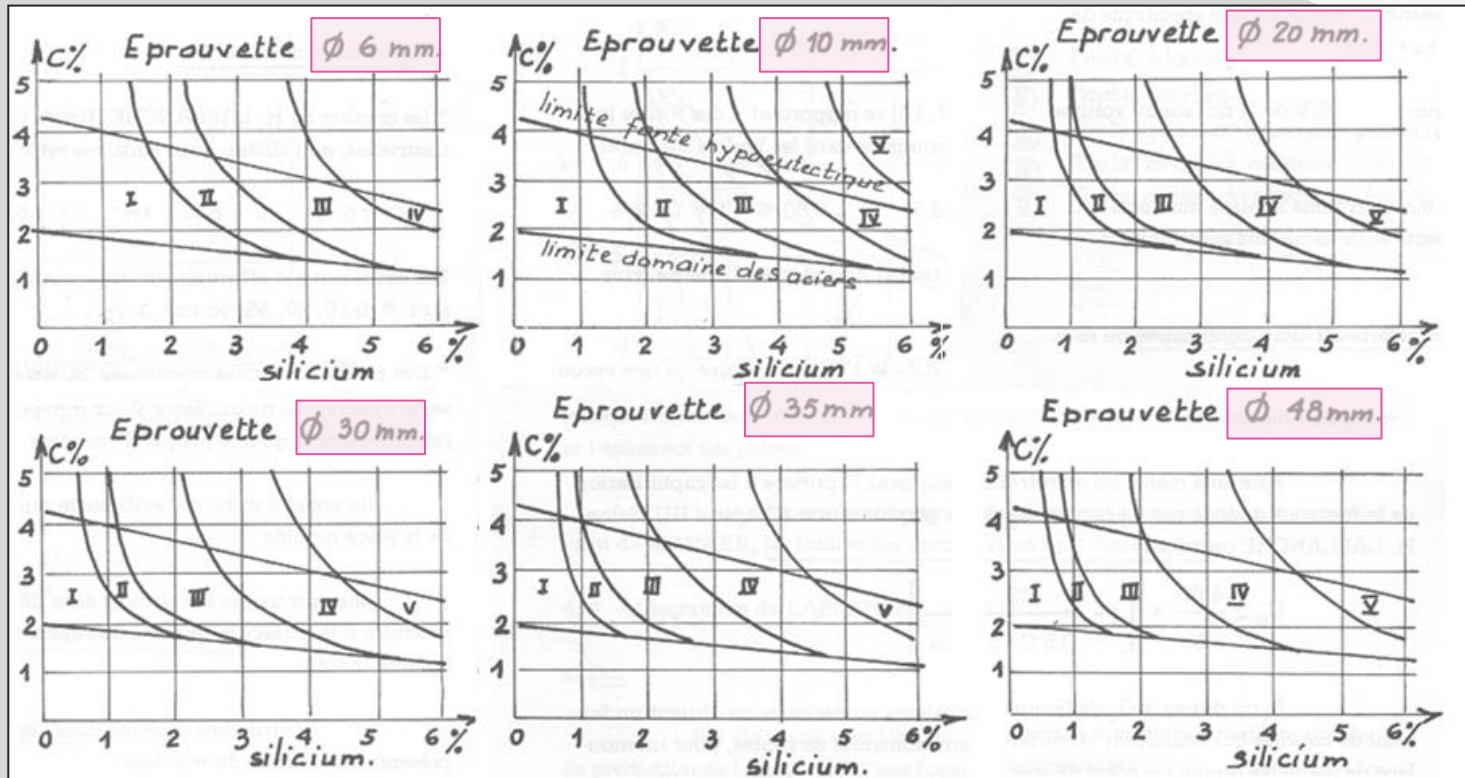


Choix composition chimique de la fonte

- Quelles sont les paramètres influents sur la microstructure obtenue?

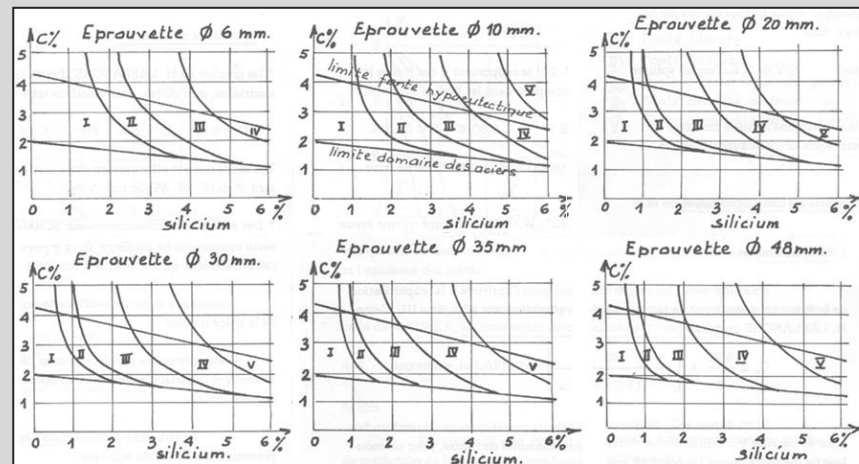
- La vitesse de refroidissement de la pièce :

$$M_t = \omega \cdot \frac{V}{S}$$



Démarche

- Le **cahier des charges** permet de déterminer quelle est la **nature de la matrice** à élaborer.
- Le **module thermique** de la pièce peut être calculé en fonction de sa géométrie



- Une fois ces deux informations connues, le **diagramme de Laplanche** permet de choisir un couple %mC / %mSi adéquat.

Plan de la présentation

1

Intérêts des différentes familles de fontes

2

Elaboration d'une fonte grise

3

Détermination compo chimique

4

Calcul de chargement

5

Contrôle des fontes



- Cycle de valorisation des Matières Premières

LE RECYCLAGE DES FERRAILLES ET MÉTAUX FERREUX

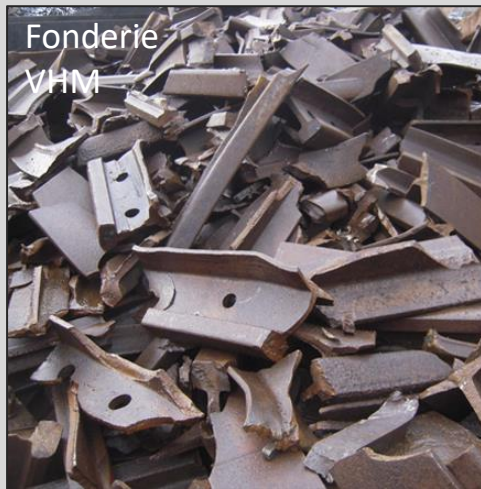
Matières premières utilisées



Acier



Chute emboutissage



Rails de
chemin de fer

Pièces
automobiles



Matières premières utilisées



Ogab

Disque frein



Fonderie Dechaumont



Déchets ferreux divers



Jante



Fonte

Calcul du chargement

■ Démarche générale

Lit de fusion initial

dans le four

Retours Fonte
Fonte neuve



Traitements

dans la poche de traitement

- Inoculation dans la poche

Inoculin 90 poche

- Sphéroïdisation

Nodulant 116 RE

- Acier de couverture

Acier DBA



Fonte souhaitée

coulée dans le moule

% C=?

% Si=?

% Mn=?

% Mg_{résiduel} = ?

4

Calcul de chargement



Arts
et Métiers
Sciences et
Technologies



Calcul du chargement

■ Démarche générale

Lit de fusion initial

dans le four

Retours Fonte
Fonte neuve



Traitements

dans la poche de traitement

- Inoculation dans la poche

Inoculin 90 poche

- Sphéroïdisation

Nodulant 116 RE

- Acier de couverture

Acier DBA



Fonte souhaitée

coulée dans le moule

% C=?

% Si=?

% Mn=?

% Mg_{résiduel} = ?

4

Calcul de chargement



Arts
et Métiers
Sciences et
Technologies



Calcul du chargement

■ Démarche générale

Lit de fusion initial

dans le four

Retours Fonte
Fonte neuve
Ferro-silicium (FeSi75MFG)
Manganèse (Gimel)
Graphite
Acier (Acier DBA)



RENDEMENT



Traitements

dans la poche de traitement

■ Inoculation dans la poche

Inoculin 90 poche

■ Sphéroïdisation

Nodulant 116 RE

■ Acier de couverture

Acier DBA



Fonte souhaitée

coulée dans le moule

% C=?

% Si=?

% Mn=?

% Mg_{résiduel} = ?

4

Calcul de chargement



Arts et Métiers
Sciences et Technologies



Calcul du chargement

■ Démarche générale

Lit de fusion initial

dans le four

Retours Fonte
Fonte neuve
Ferro-silicium (FeSi75MFG)
Manganèse (Gimel)
Graphite
Acier (Acier DBA)

ATTENTION!
RENDEMENT

+

Traitements

dans la poche de traitement

■ Inoculation dans la poche

Inoculin 90 poche

■ Sphéroïdisation

Nodulant 116 RE

■ Acier de couverture

Acier DBA

=

Fonte souhaitée

coulée dans le moule

% C=?

% Si=?

% Mn=?

% Mg_{résiduel} = ?

LIT DE FUSION	
LIT DE FUSION (dans le four)	
	m (g)
Fonte neuve	10 740,0
Retour fonte	0,0
Acier DBA hors poche	0,0
FeSi75 MFG	152,1
Gimel F (Mn)	45,1
Graphite	64,9
Total	11002,1
PRODUITS DE TRAITEMENT (dans la poche de traitement)	
Dans la poche	
	m (g)
Acier DBA	150,0
Inoculin 90 poche	56,5
Nodulant 116 RE	120,5
In mold	
	m (g)
Inoculin 90 in mold	0,00

PRODUITS DE TRAITEMENT																
	C		Si		Mg		Mn		S		P		Al		Z	
	%	η	%	η	%	η	%	η	%	η	%	η	%	η	%	η
Acier DBA	0,15	1	0,4	1		1	0,3	1		1		1		1		1
Inoculin 90 in mold		1	65	0,95		1	4	1		1		1	1,4	1	4	1
Nodulant 116 RE		1	46	0,95	6	1		1		1		1	0,8	1		1
Inoculin 90 poche		1	65	0,95		1	4	0,5		1		1	1,4	1	4	1

4

Calcul de chargement



Arts et Métiers
Sciences et Technologies



Calcul du chargement

■ Exercice à effectuer

- Télécharger le fichier « 2- Exercice FGS : Calcul de chargement » sur :

SAVOIR / AN-2A-GIM-Concevoir / Interaction Procédé Matériau / Fonderie / ED
Elaboration Fonte GS

<https://savoir.ensam.eu/moodle/course/view.php?id=5520¬ifyeditingon=1#section-8>

- Onglet « Exercice » : les masses des produits de chargement et de traitement sont fournis
 - Onglet « Composition produit » : les compositions chimiques des produits et les rendements des éléments chimiques de chaque produit sont fournis
- Vous devez effectuer un nouvel onglet dans lequel on doit retrouver:
 - un tableau qui permet de déterminer la composition chimique du bain de fusion initial une fois tous les produits de chargement fondus
 - un tableau qui permet de déterminer la composition chimique de la pièce finale coulée (produit de chargement + produit de traitement)

FIN DU TRAVAIL A EFFECTUER
AVANT LE TP SUR LES FONTES GS

-

LA SUITE DU SUPPORT SERA UTILISEE DANS LE
CADRE DU TP SUR LES FONTE GS

Plan de la présentation

1

Intérêts des différentes familles de fontes

2

Elaboration d'une fonte grise

3

Détermination compo chimique

4

Calcul de chargement

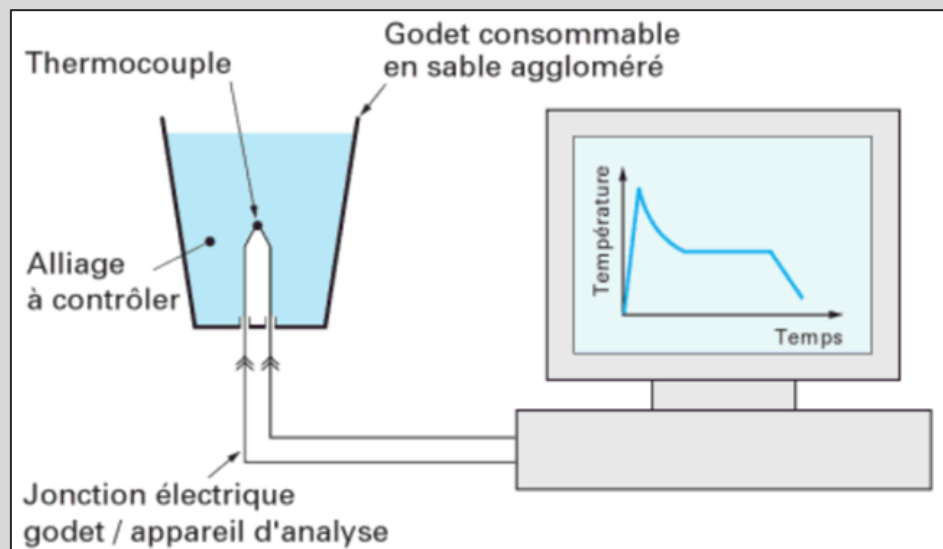
5

Contrôle des fontes



Principe du contrôle par analyse thermique

- **Prélèvement** d'une petite quantité d'alliage **dans le four** (environ 350g)
- **Coulée** de cet alliage dans un **godet d'analyse thermique** contenant un thermocouple
- Récupération de la courbe d'**évolution de la température en fonction du temps** (via une centrale d'acquisition)

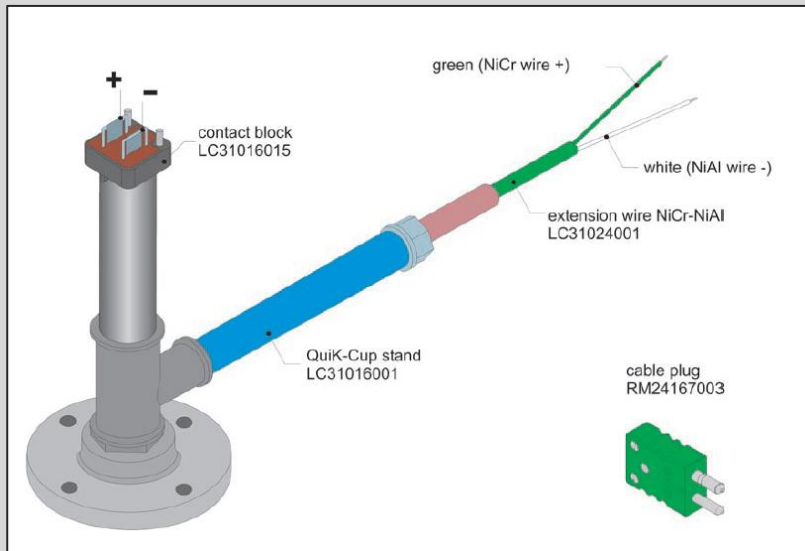


Dispositif expérimental



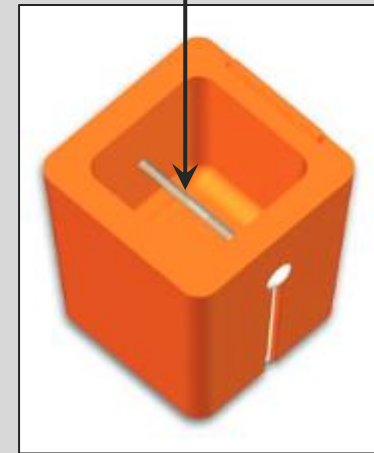
Principe du contrôle par analyse thermique

■ Détails du dispositif expérimental

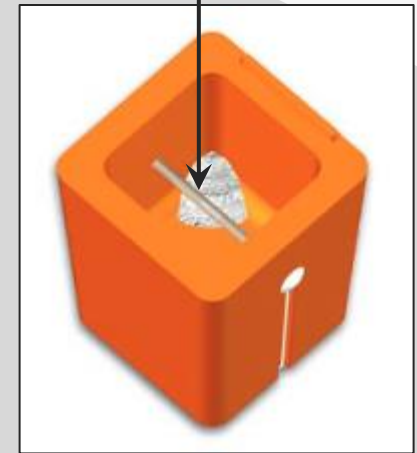


Pied d'analyse thermique sur lequel sont déposés les godets d'analyse thermique

Gaine en verre dans laquelle se trouve la soudure du thermocouple



Godet d'analyse thermique
Vide



Avec une pastille
de Tellure

Principe du contrôle par analyse thermique

■ Trois types d'évènements principaux sur une courbe d'analyse thermique :

- ① Une décroissante exponentielle : refroidissement sans transformation de phases
- ② Un palier : passage d'une transformation isotherme
- ③ Un point d'inflexion : création d'une nouvelle phase

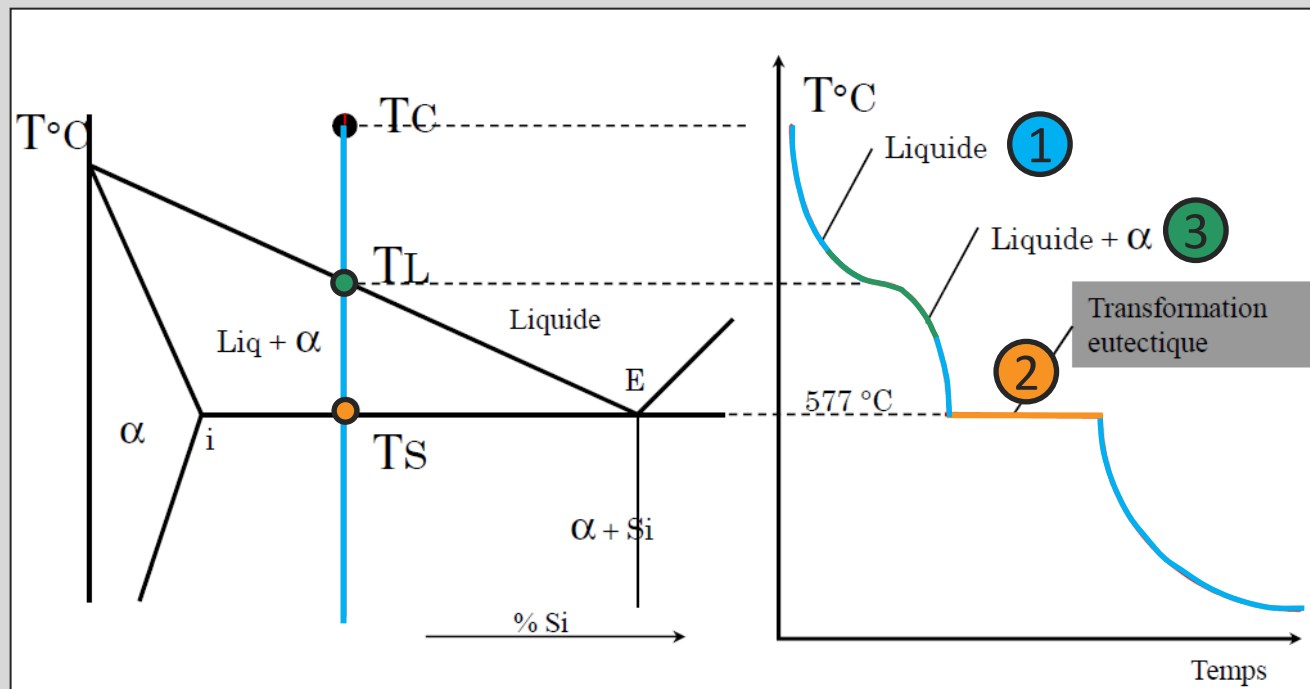
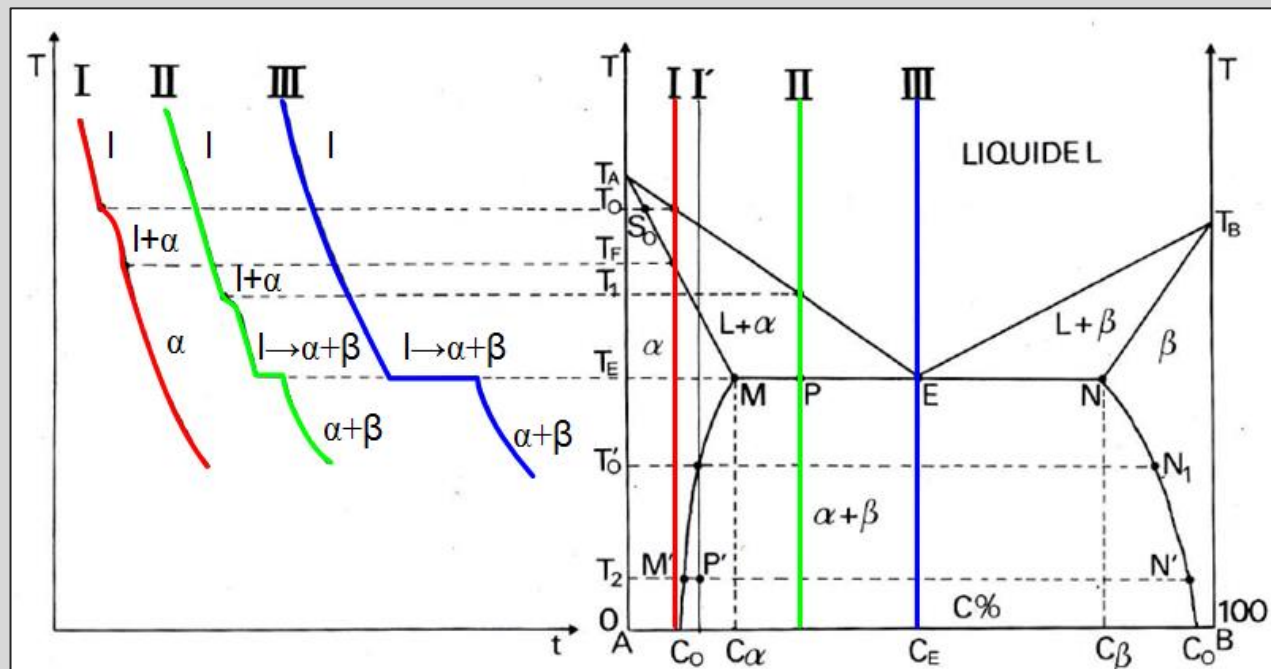


Diagramme de phases Al-Si

Courbe AT associée à cet alliage

Principe du contrôle par analyse thermique

- Chaque alliage (composition chimique donnée) a une courbe d'analyse thermique propre
- A partir des **résultats d'une analyse thermique**, on peut remonter à la **composition chimique de l'alliage**

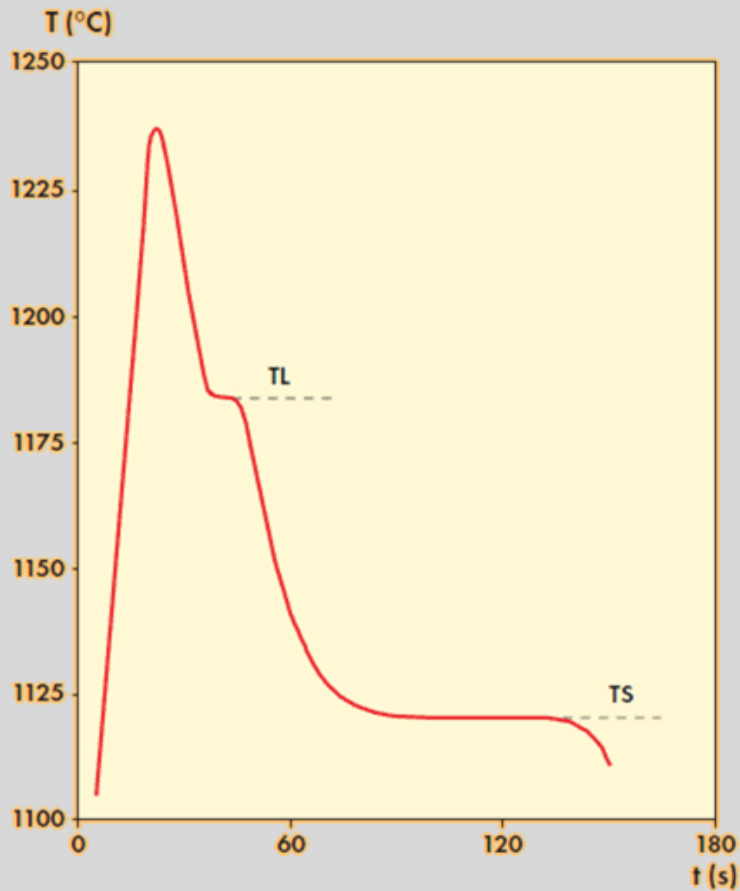


Courbe AT de 3 alliages A-B

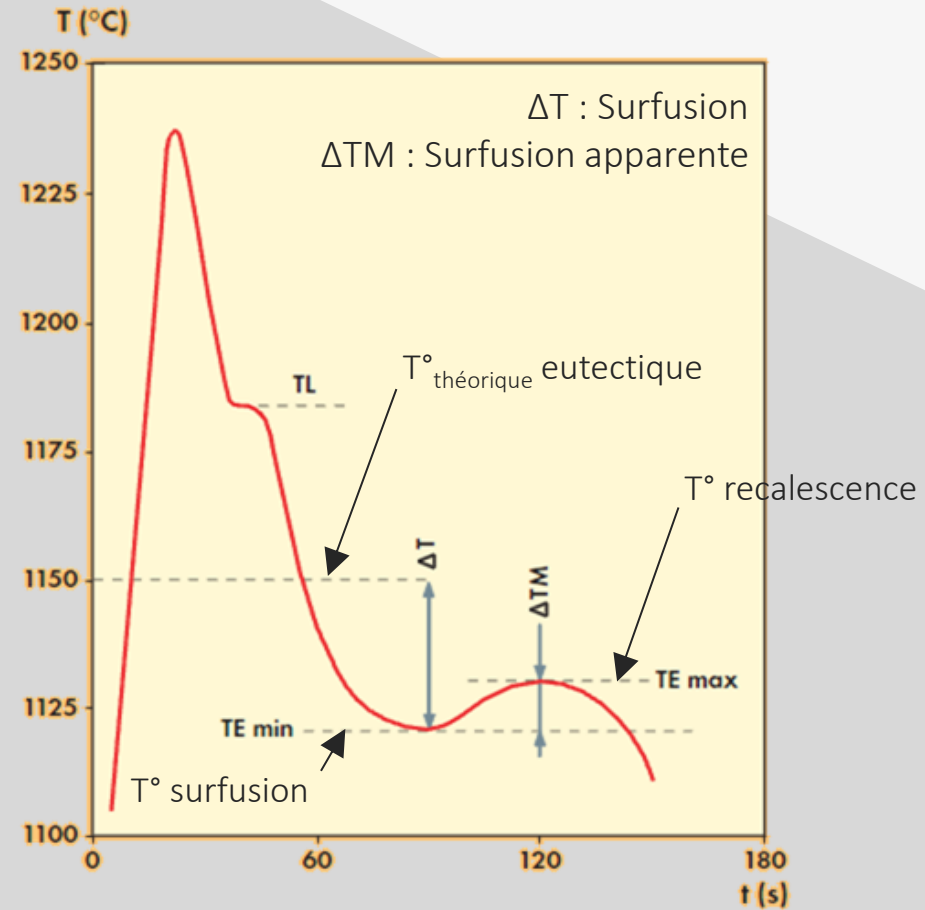
Diagramme de phases des alliages A-B

Analyse thermique d'une fonte

Fonte blanche

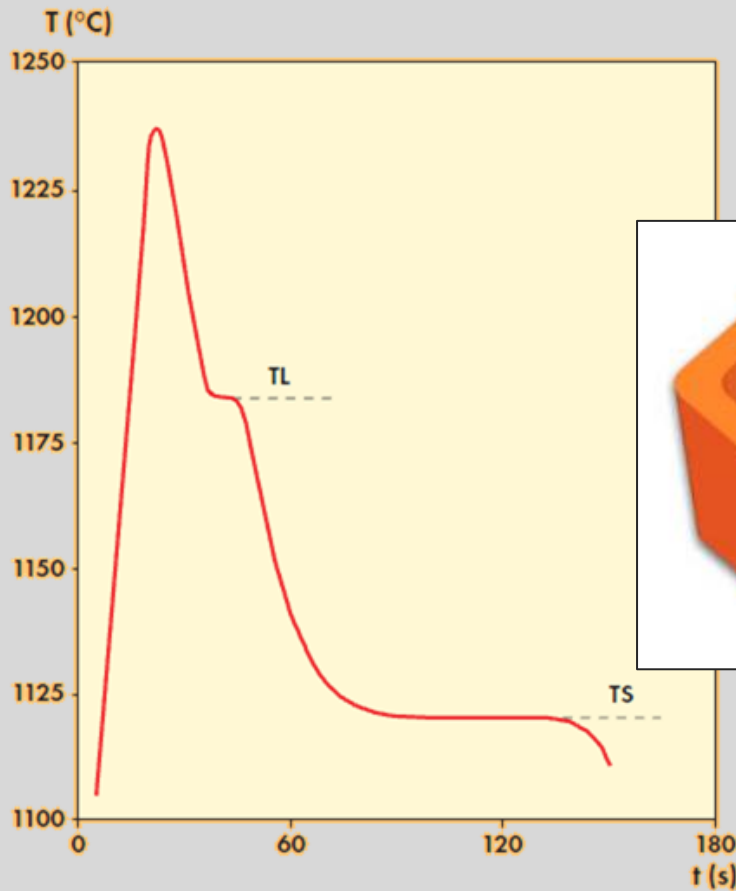


Fonte grise

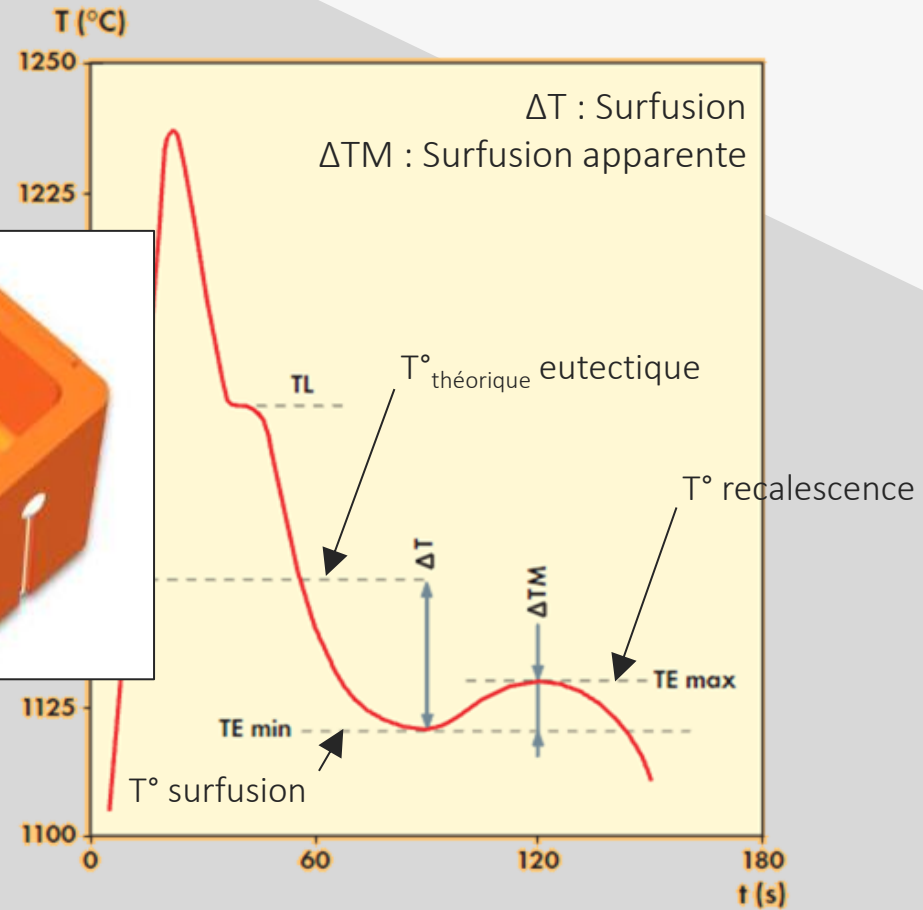


Analyse thermique d'une fonte

Fonte blanche



Fonte grise



Détermination composition chimique

- Détermination de la **composition en carbone et silicium** de la fonte en fonction des **résultats d'analyse thermique**

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

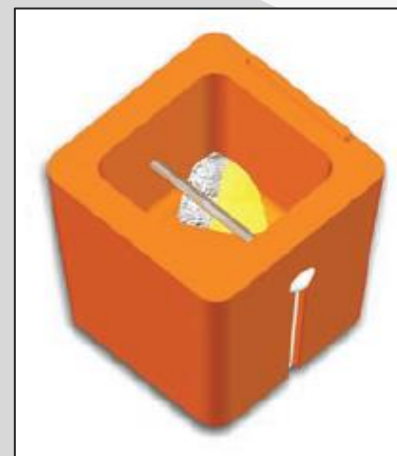


On observe une courbe de refroidissement dans le diagramme métastable (fonte blanche)

Détermination composition chimique

- Détermination de la **composition en carbone et silicium** de la fonte en fonction des **résultats d'analyse thermique**

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



On observe une courbe de refroidissement dans le diagramme métastable (fonte blanche)

Détermination composition chimique

- Notion de **Carbone Equivalent** :

$$\% Ceq = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

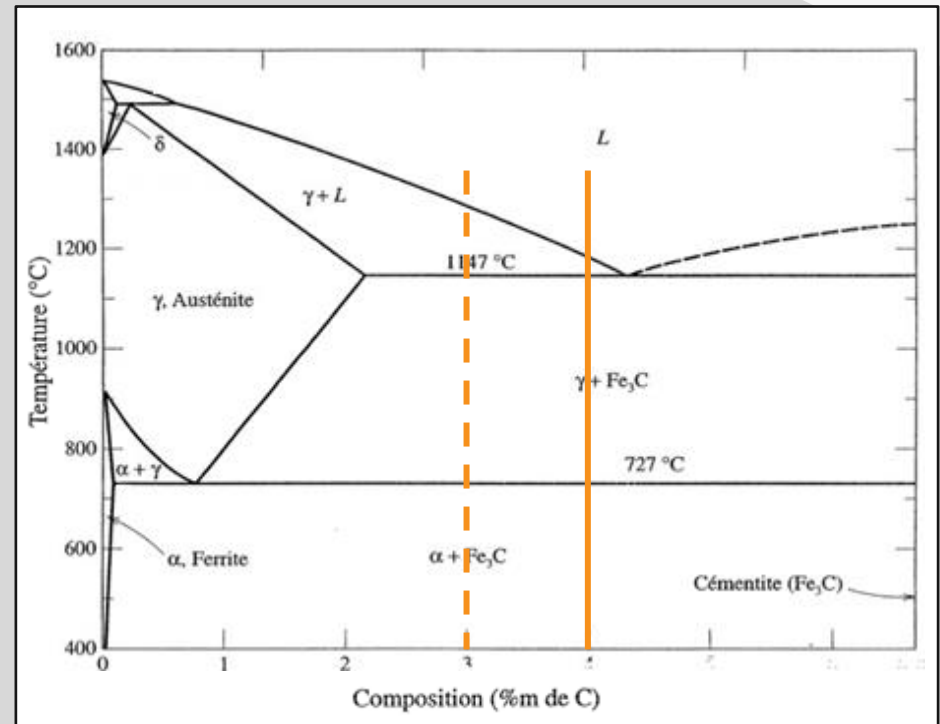
Composition chimique :

%m C = 3 - - - - -

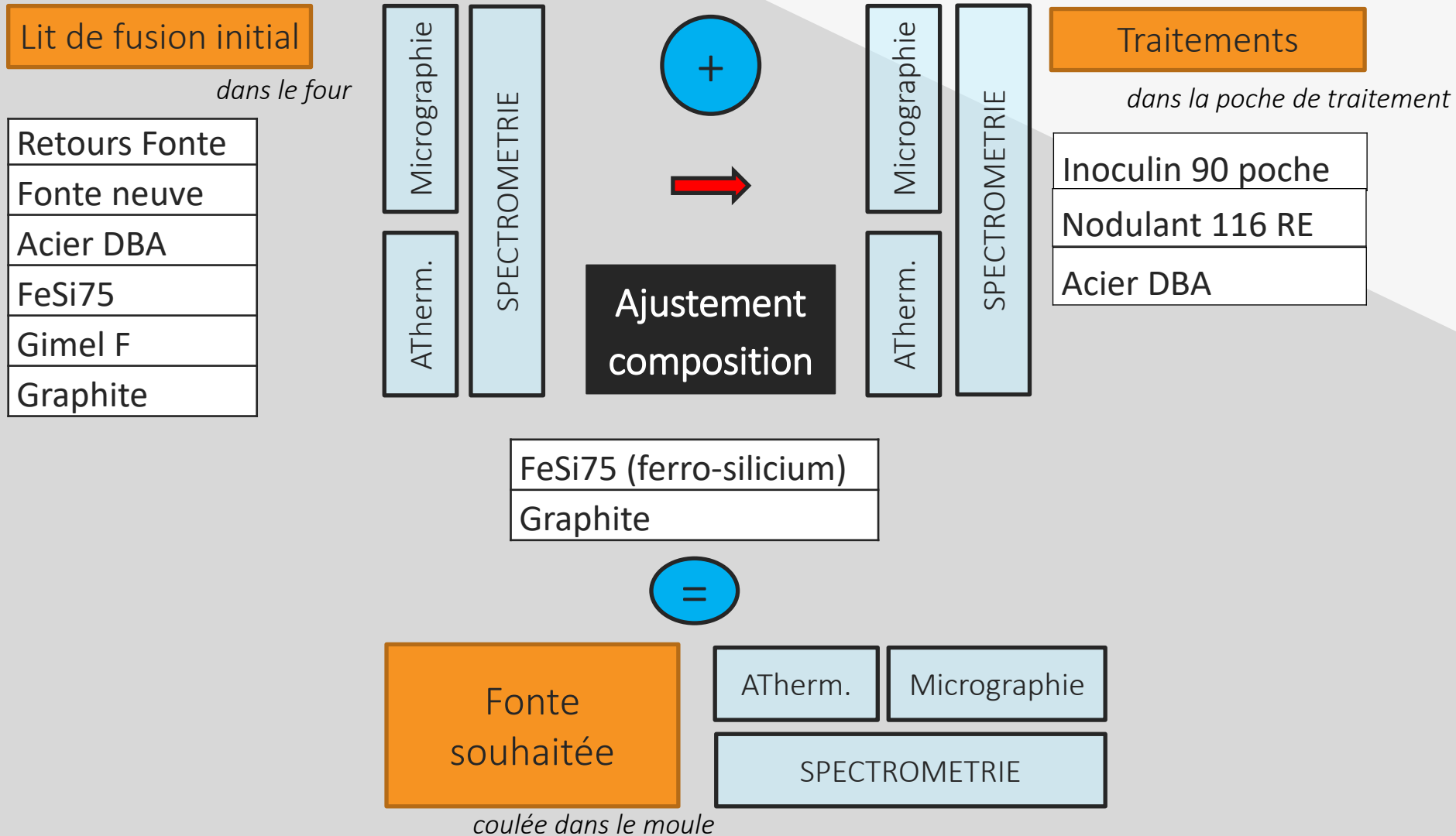
%m Si = 3

%m P = 0

%m Ceq = 4 —————



Récapitulatif de la manipulation expérimentale



Merci de votre attention.

Pour aller plus loin :

- Techniques de l'Ingénieur : Fontes à graphite sphéroïdal - Propriétés de mise en œuvre
- Techniques de l'Ingénieur : Fontes à graphite sphéroïdal - Propriétés d'utilisation
- Techniques de l'Ingénieur : Elaboration des fontes à graphite sphéroïdal

