

Métaux - IV. Les alliages – 3^{ème} partie

Anne Mertens

Rappel: modèle du cristal parfait

- Propriétés physiques : OK
 - Densité, T_{fusion} , dilatabilité
- Propriétés mécaniques : pas satisfaisant
 - OK pour élasticité
 - Niveaux de contraintes prédits pour le clivage ou la déformation plastique sont trop élevés.
- Propriétés de conduction: $\pm$ OK
 - Mais on ne peut expliquer que l'effet d'un seul paramètre: T

$\Rightarrow$ Il faut prendre en compte les défauts!

Rappel : les défauts cristallins

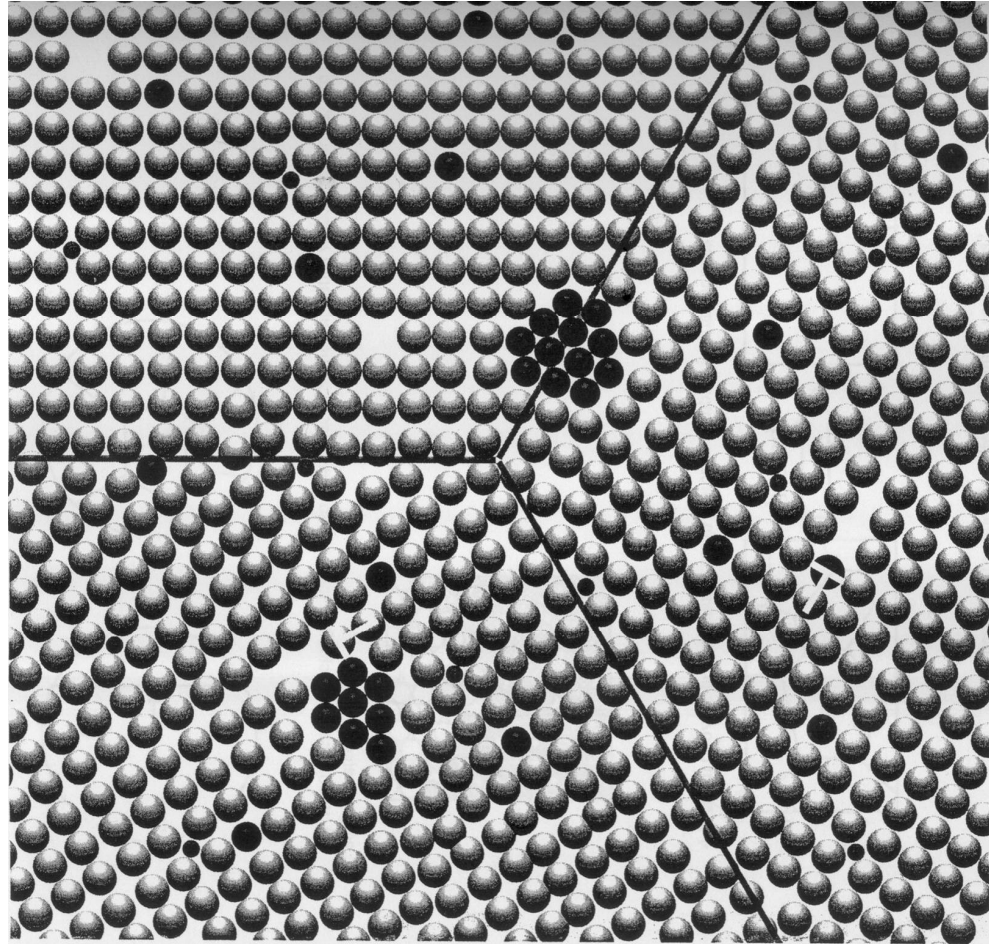
4 types de défauts cristallins (pour un métal pur)

- Défauts ponctuels: lacunes $\Rightarrow$ diffusion
- 1D - dislocations $\Rightarrow$ plasticité, consolidation, restauration, rupture
- 2D - Matériaux polycristallins:
joint de grains et macles
Loi de Hall-Petch, isotropie vs anisotropie,
recristallisation, coalescence
- 3D - Porosités

Rappel : alliage réel

Métal A + autres éléments (B, C...)

- Atomes étrangers en solution (substitution ou insertion)
- Autres phases (précipités, intermétalliques)



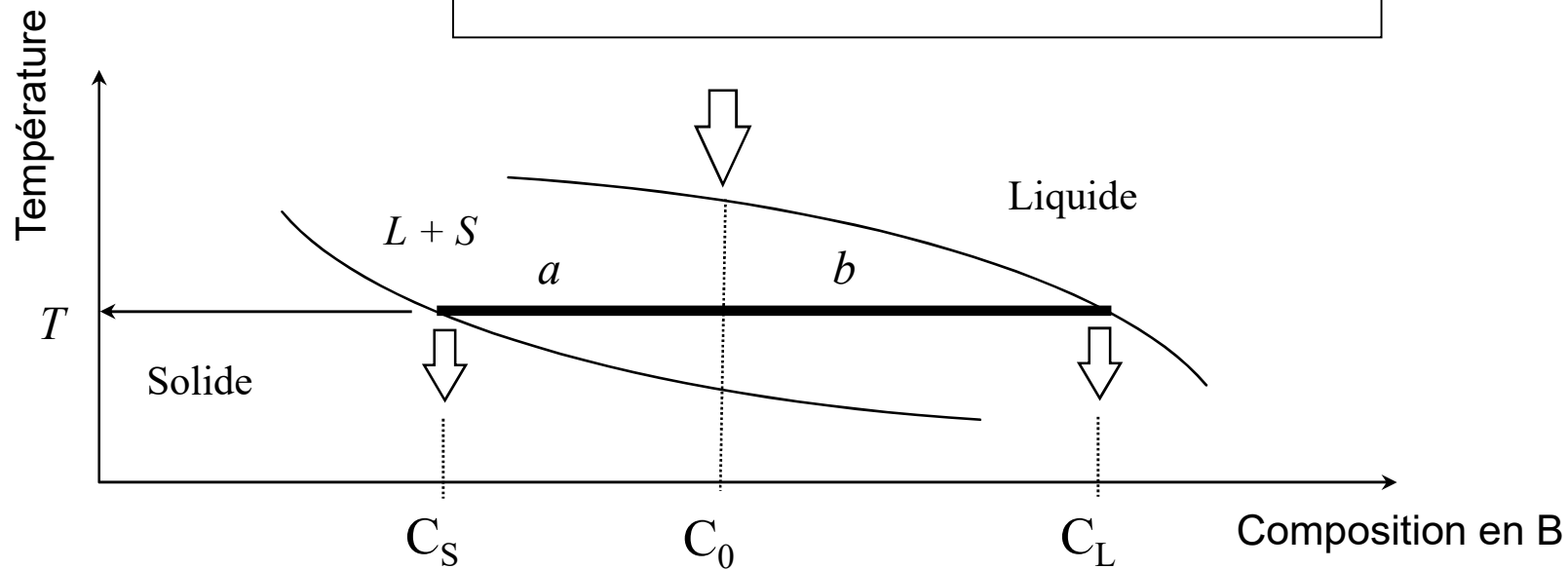
Rappel:

Exploitation des diagrammes d'équilibre

$$\%S = \frac{C_L - C_0}{C_L - C_S} 100 \quad \%L = \frac{C_0 - C_S}{C_L - C_S} 100$$

➡
$$\%S = \frac{b}{a+b} 100 \quad \%L = \frac{a}{a+b} 100$$

C'est la loi des segments inverses

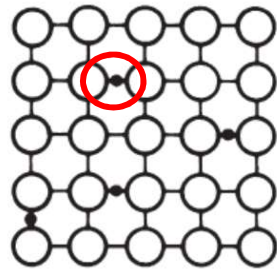


Rappel: solution vs précipitation

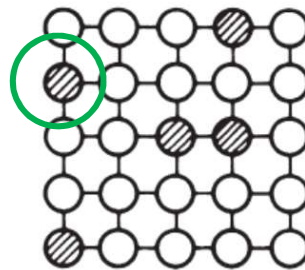
Système binaire A+B

- Mélanges : cristaux de A et cristaux de B
- Solutions solides : le B se dissout dans les cristaux de A
→ Possible durcissement par solution solide
- Combinaisons intermétalliques : Cristaux de A_xB_y ayant un réseau différent de A et de B (ionique ou covalent).
→ Possible durcissement par précipitation

Rappel: Solution vs précipitation



Insertion



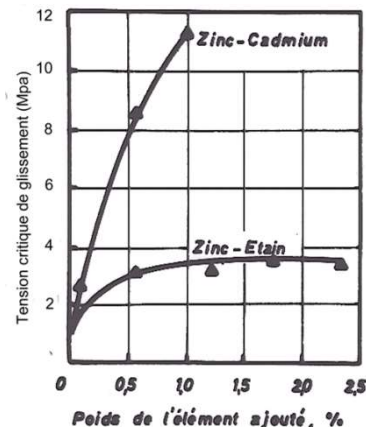
Substitution

$$d_{\text{inséré}} \leq 0,6d_{\text{solvant}}$$

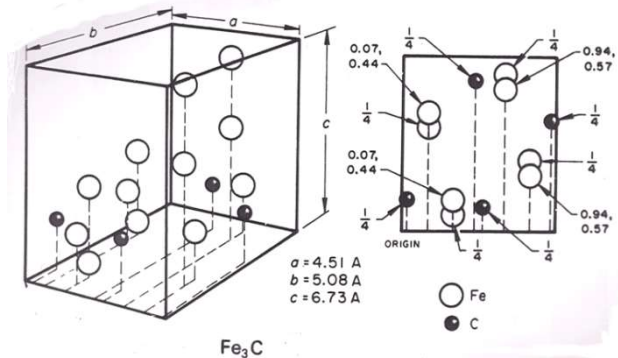
Distorsion du réseau cristallin

⇒ **Durcissement de solution solide**

$$\sum_{i=2}^n a_i [\%i]$$

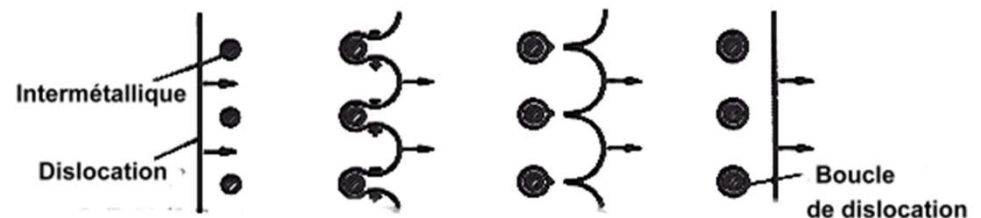


Intermétalliques, p.ex: Fe_3C



Durcissement par précipitation

$$\Delta\sigma = c \frac{Gb f^{1/3}}{d}$$

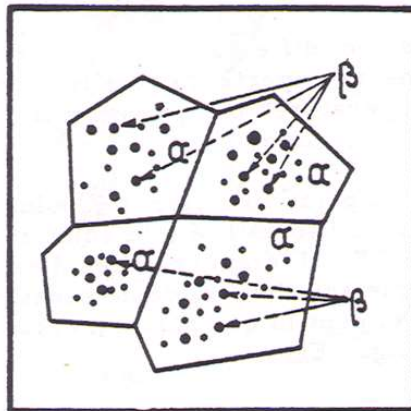


Rappel : Durcissement de précipitation

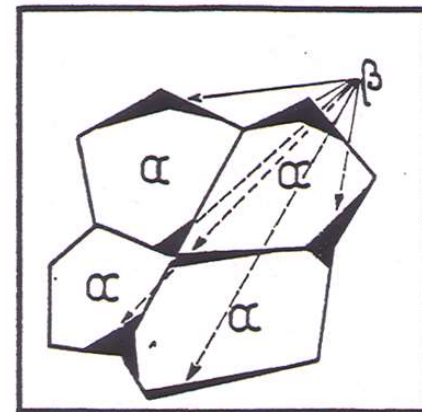
- On obtient un durcissement optimum en refroidissant une solution solide et en franchissant **rapidement** une lacune de solubilité $\Rightarrow$ Précipitation et durcissement

$$\Delta\sigma = c \frac{Gb f^{1/3}}{d}$$

On veut :



plutôt que :

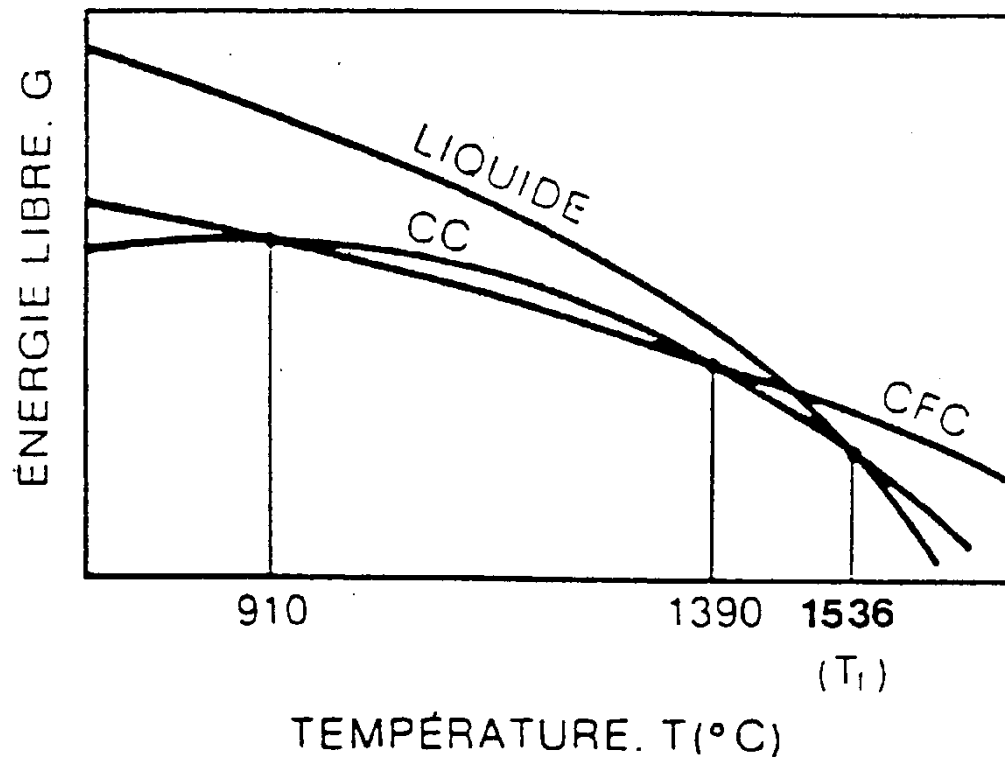


Plan

- Les solutions solides
- Les composés intermétalliques
- Les alliages Fer-Carbone : aciers et fontes
 - Rappel : Fer pur
 - Les diagrammes de phase Fer-Carbone
 - Les aciers au carbone
 - Les aciers alliés
 - Les fontes
- Les alliages d'aluminium

Rappel: Fer pur

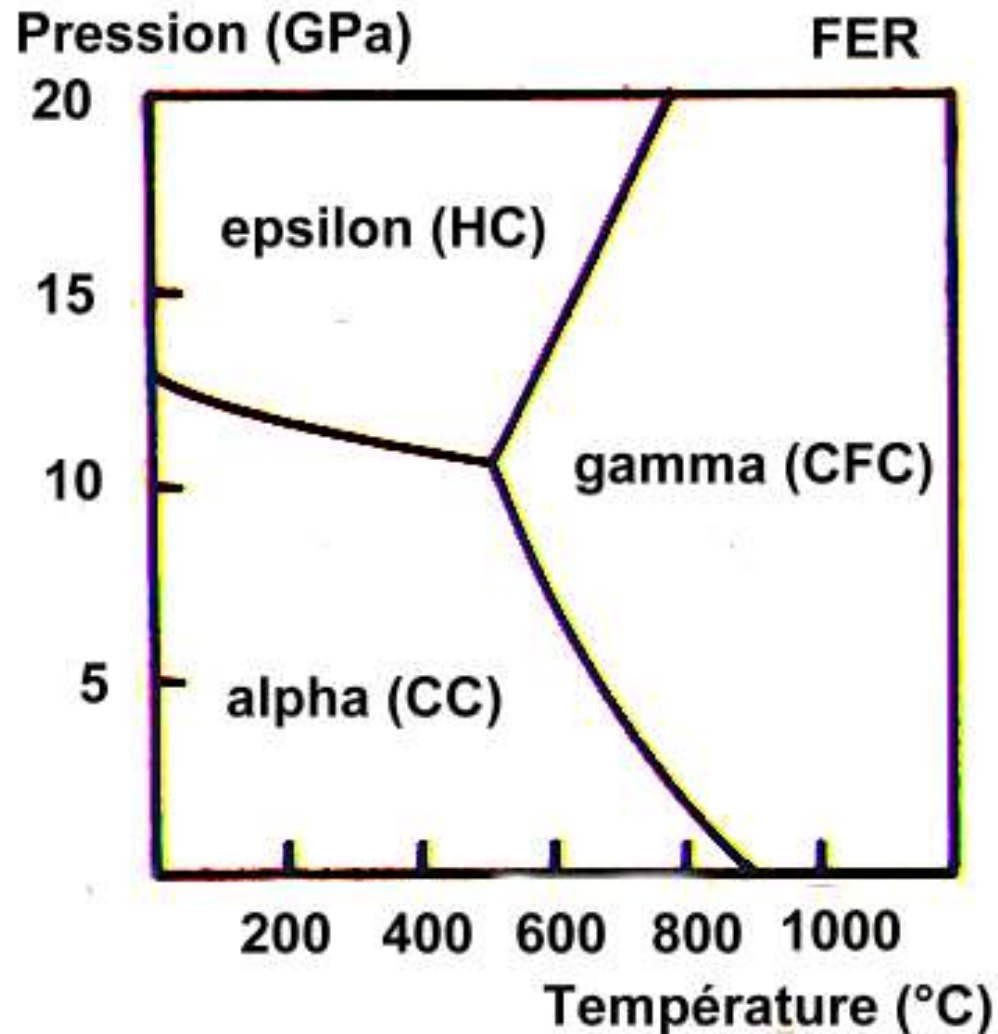
Polymorphisme du Fer
Equilibre = G minimum



Structure cristalline = f(T)

- CC à T ambiante
- CFC entre 910°C et 1390°C
- CC à T > 1390°C

Le fer pur



Structure cristalline = $f(T)$

- α (CC) à T ambiante
 - γ (CFC) entre 910°C et 1390°C
 - δ (CC) à $T > 1390^\circ\text{C}$
- à pression atmosphérique

Structure cristalline = $f(p)$

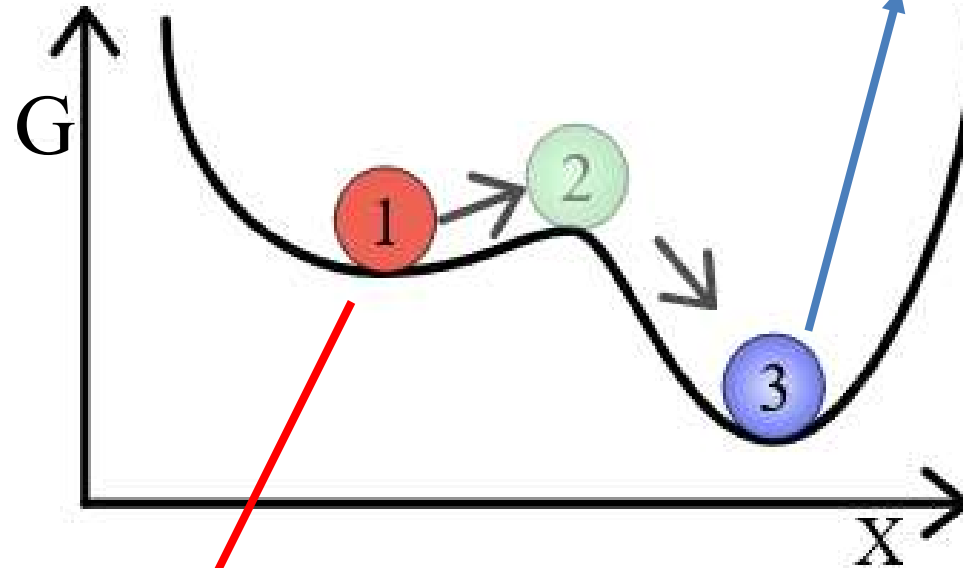
- structure + compacte: ϵ (HC) si $p \uparrow$

Fe + C

Solubilité limitée du C dans le Fer

⇒ Précipitation

Equilibre = G minimum



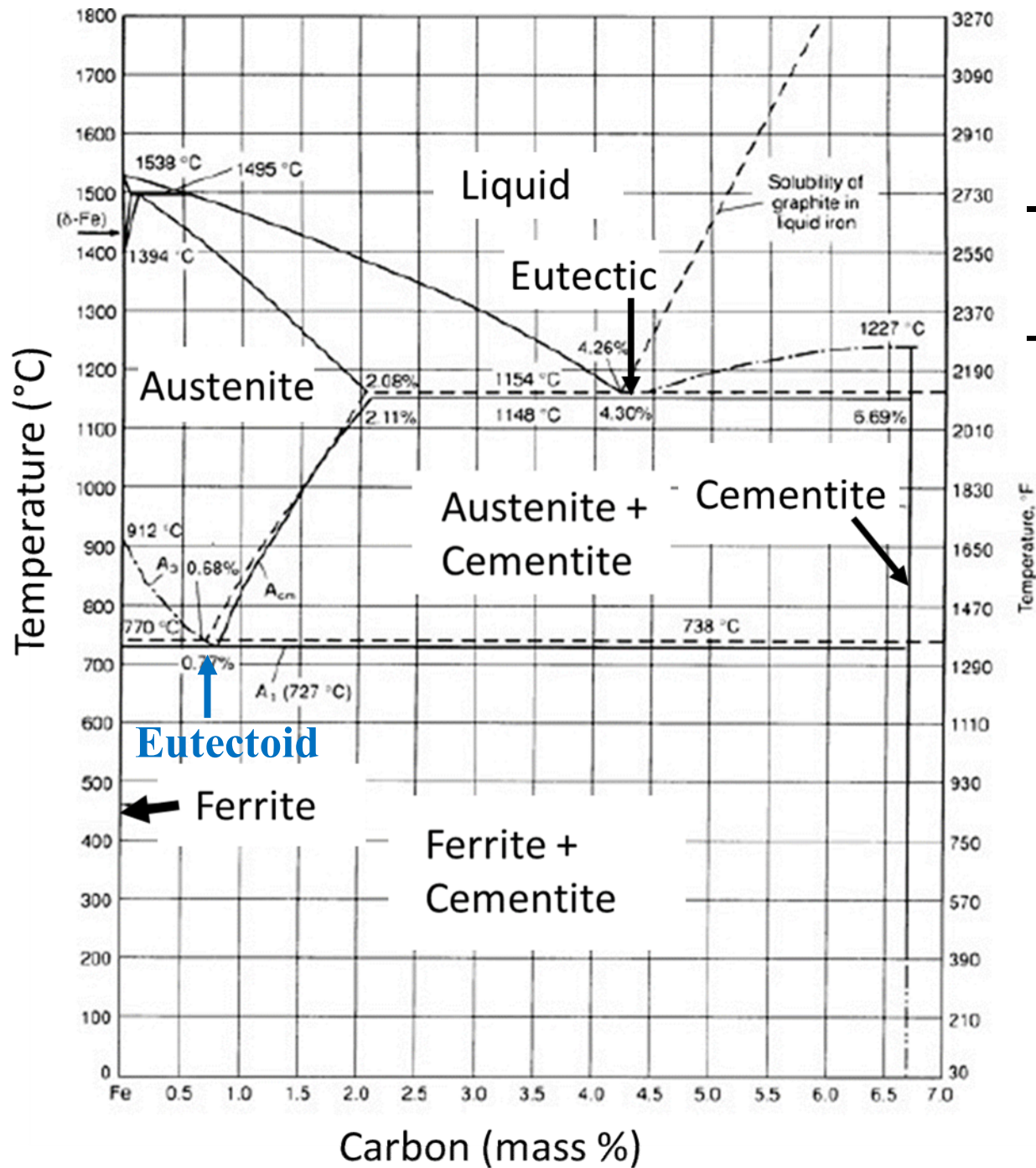
[Wikimedia]

Minimum relatif

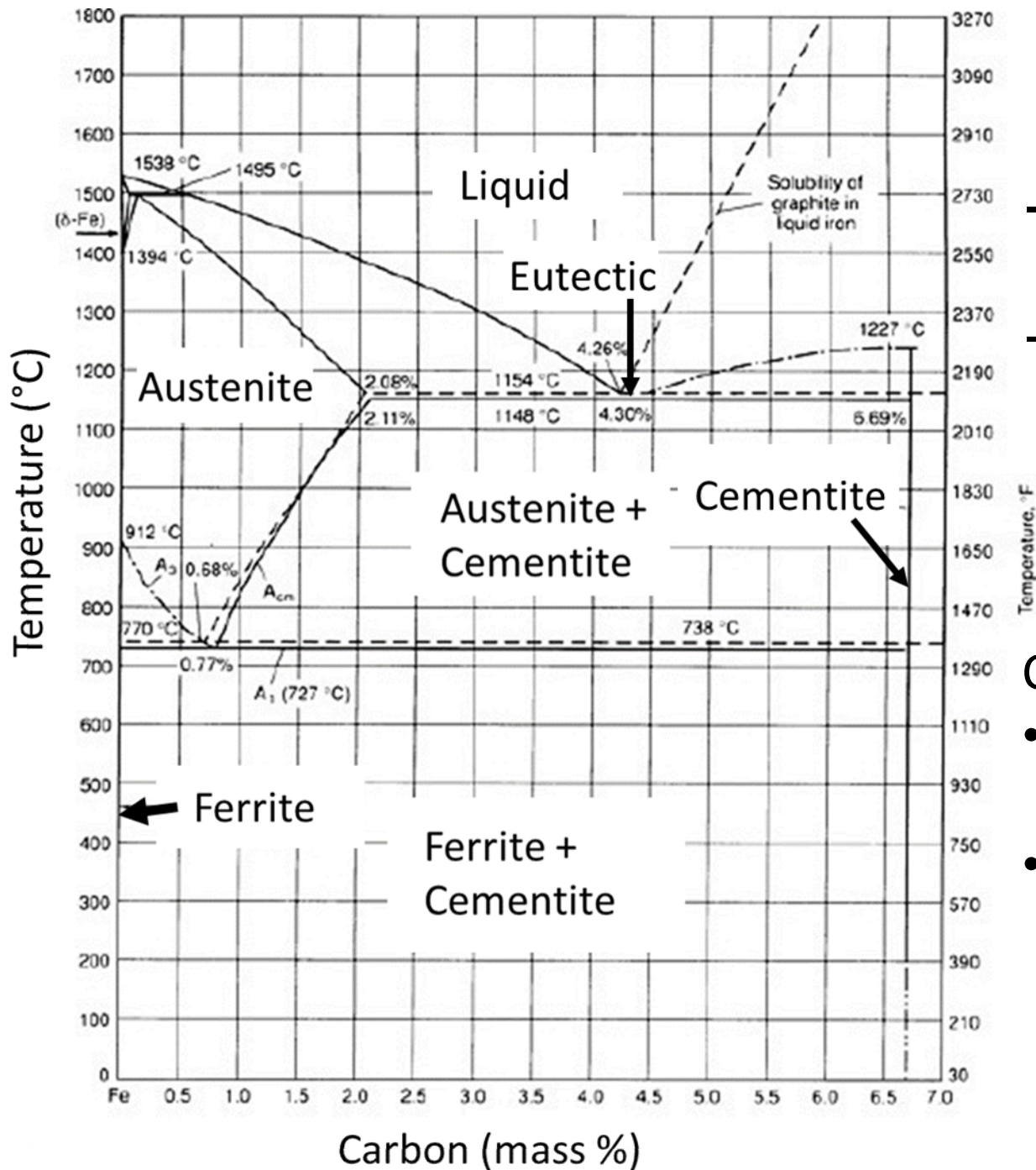
Fe - Fe₃C (cémentite): métastable

Minimum absolu
Fe - C graphite: stable

Fe + C



Fe + C



— Métastable, Fe-Fe₃C

- - - Stable, Fe-C graphite

Concentration en C

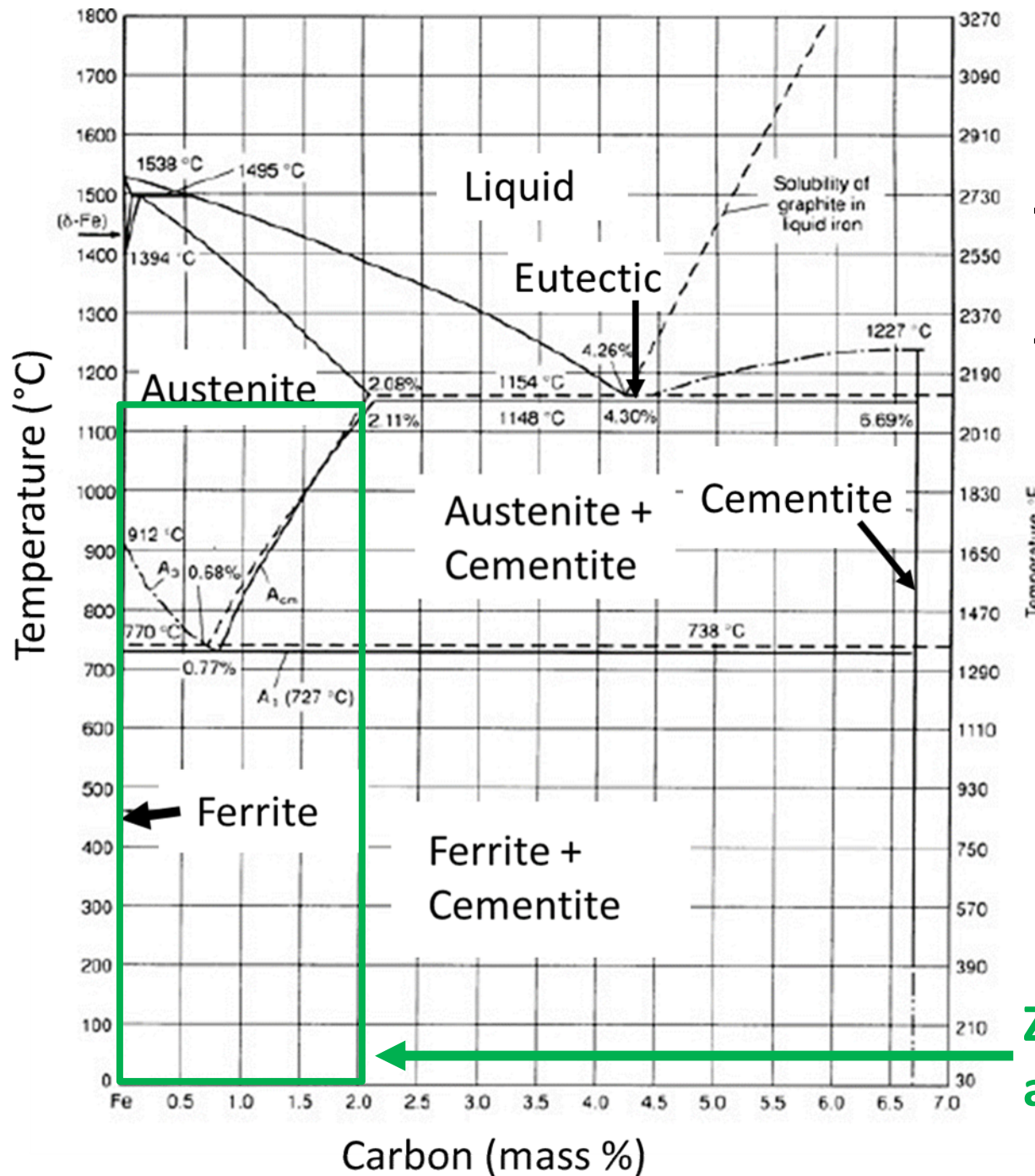
- < 2 % (masse) C: **acier**

Diagramme Fe-Fe₃C

- > 2 % (masse) C: **fonte**

Diagramme Fe-Fe₃C **ou**
diagramme Fe-graphite

Fe + C



— Métastable, Fe- Fe_3C

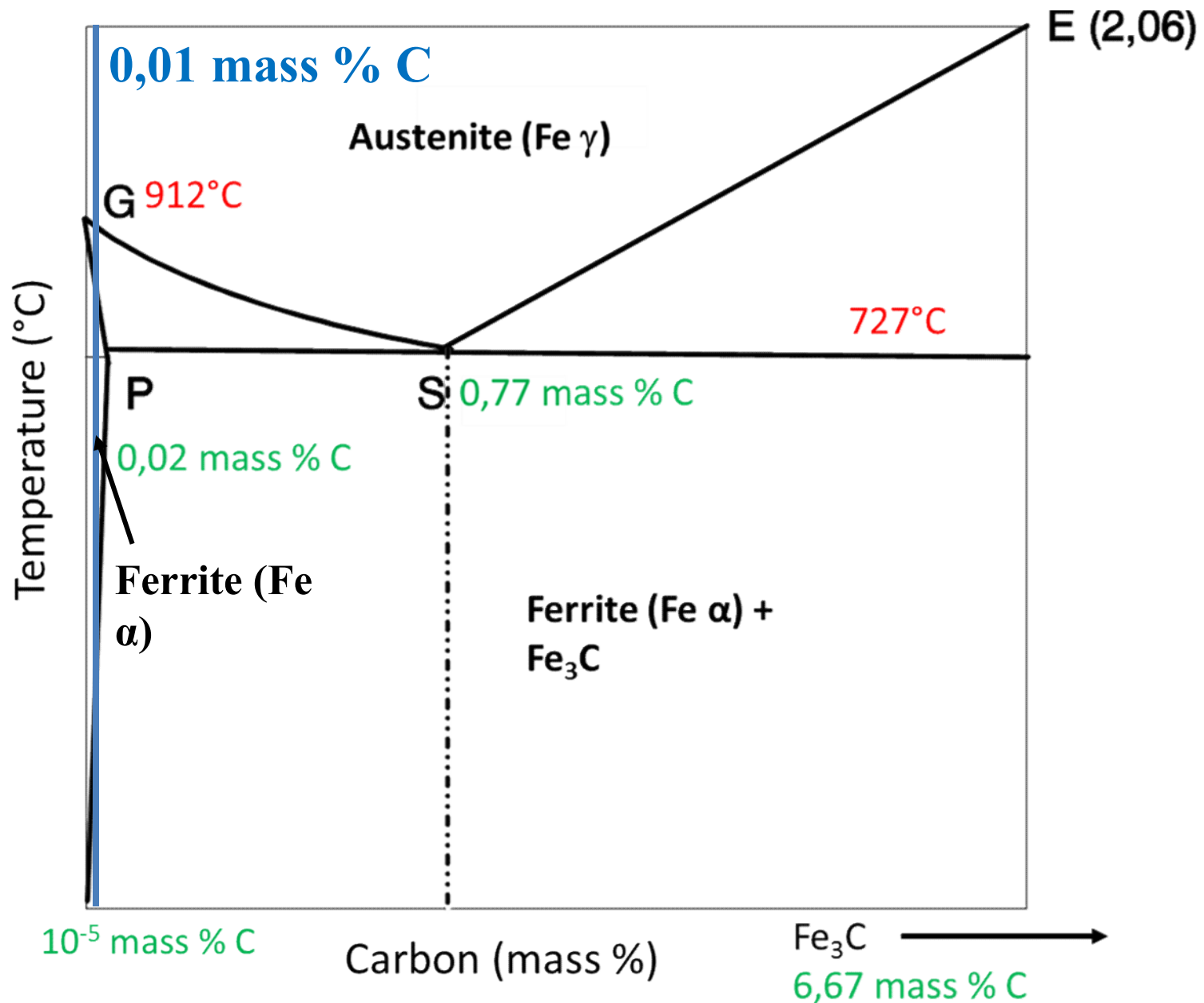
- - - Stable, Fe-C graphite

Zone d'intérêt pour les aciers au carbone

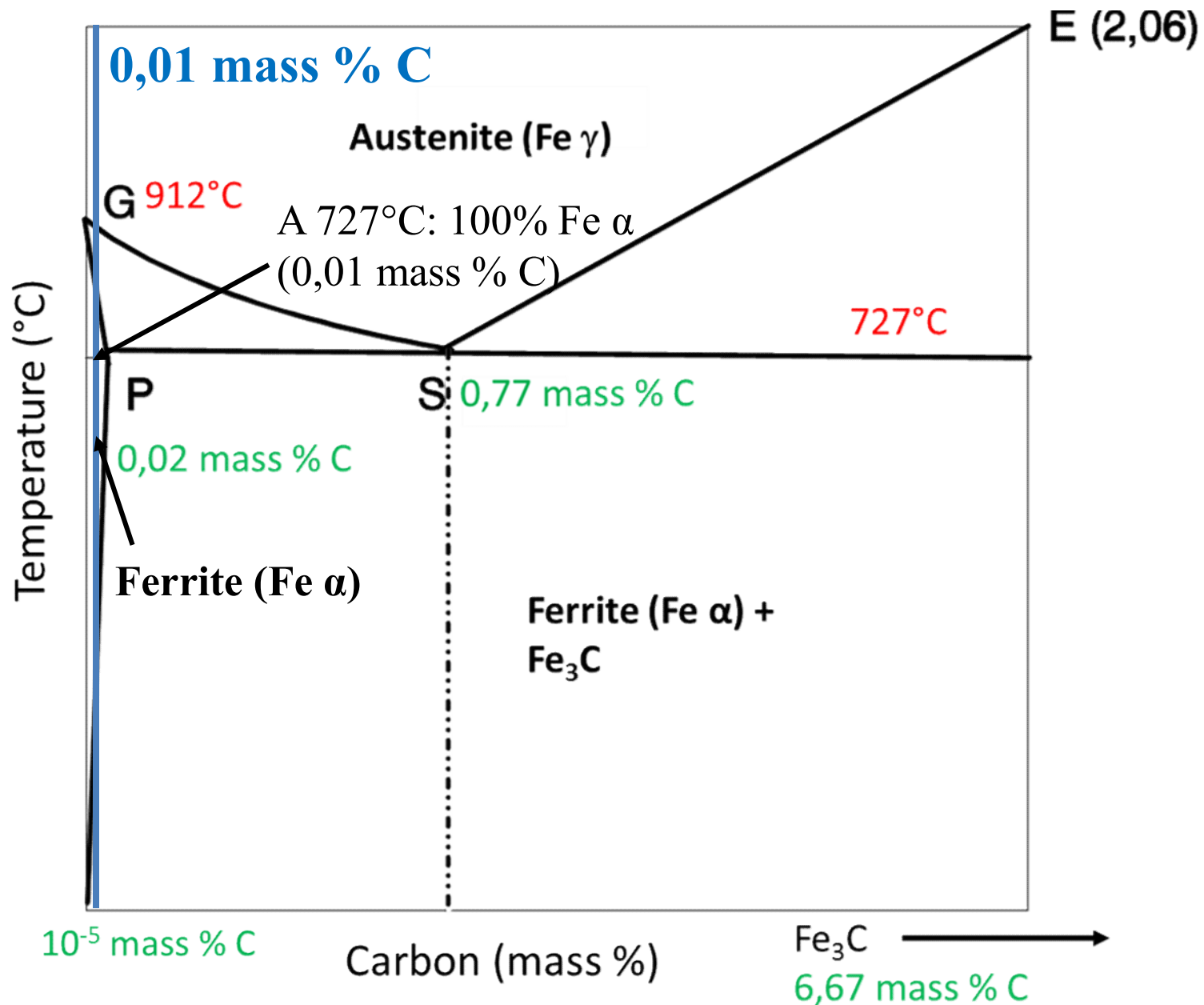
Plan

- Les solutions solides
- Les composés intermétalliques
- Les alliages Fer-Carbone : aciers et fontes
 - Rappel : Fer pur
 - Les diagrammes de phase Fer-Carbone
 - Les aciers au carbone
 - Les aciers alliés
 - Les fontes
- Les alliages d'aluminium

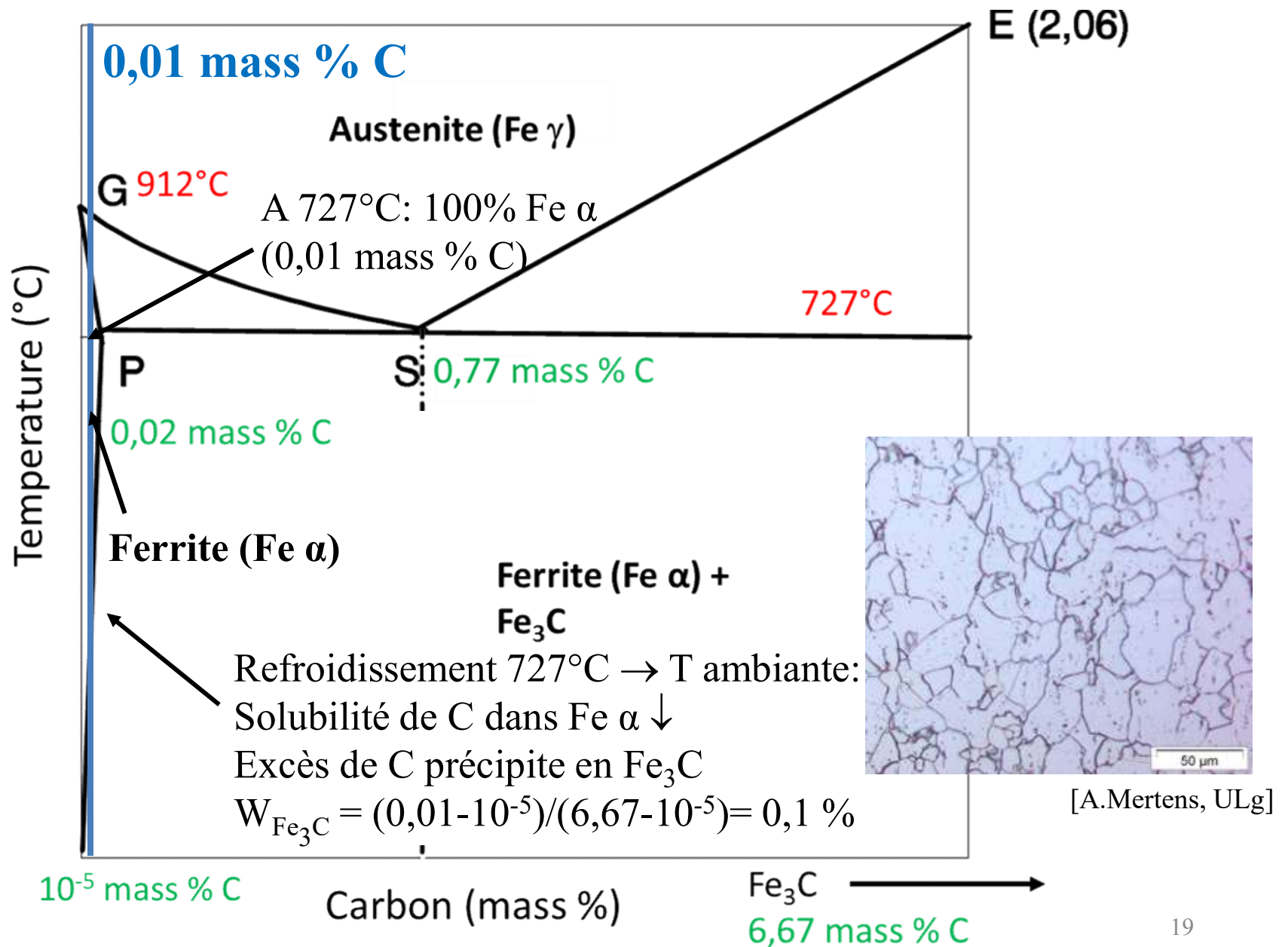
Acier ferritique (< 0,02 % (masse) C)



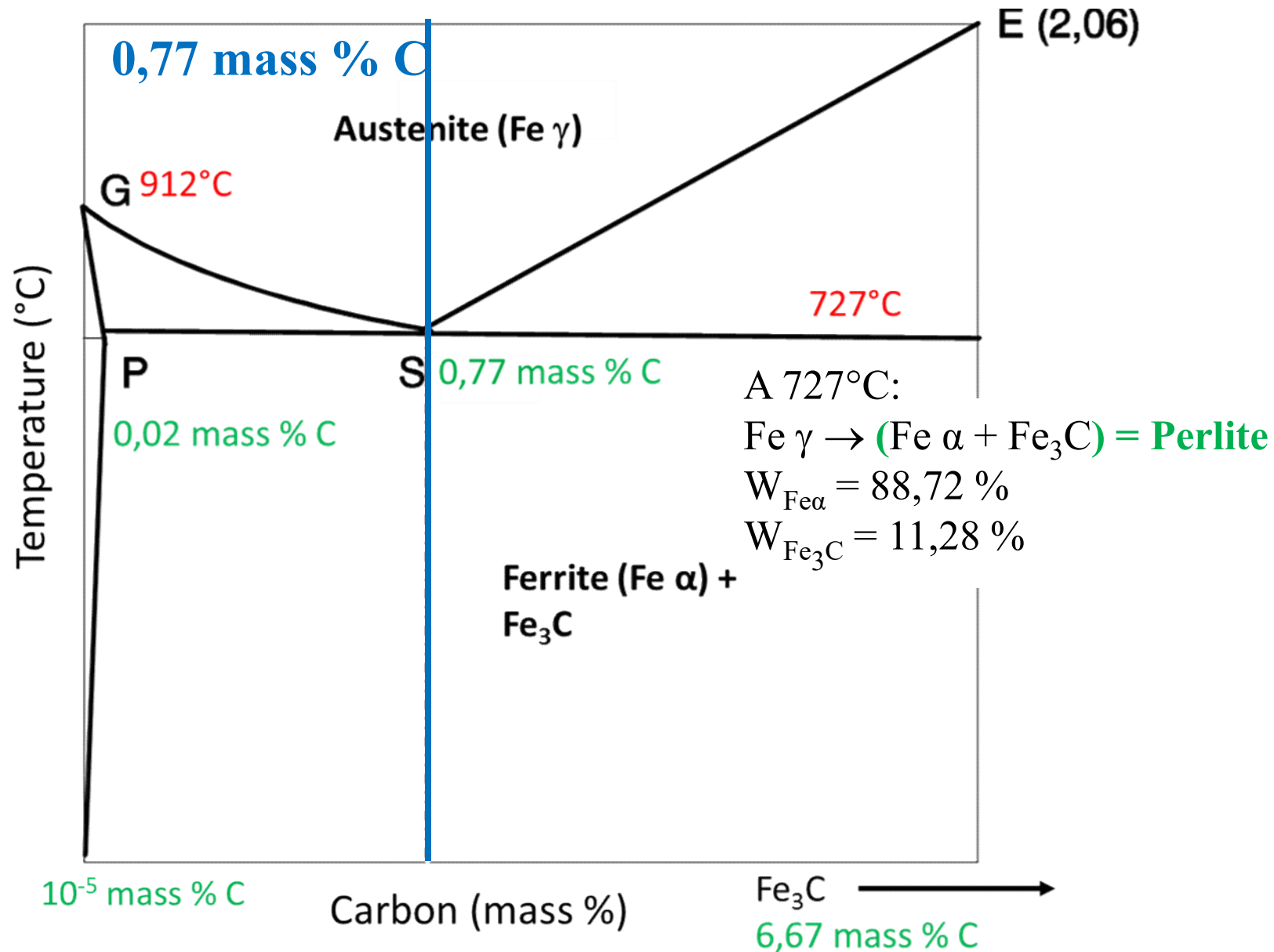
Acier ferritique (< 0,02 % (masse) C)



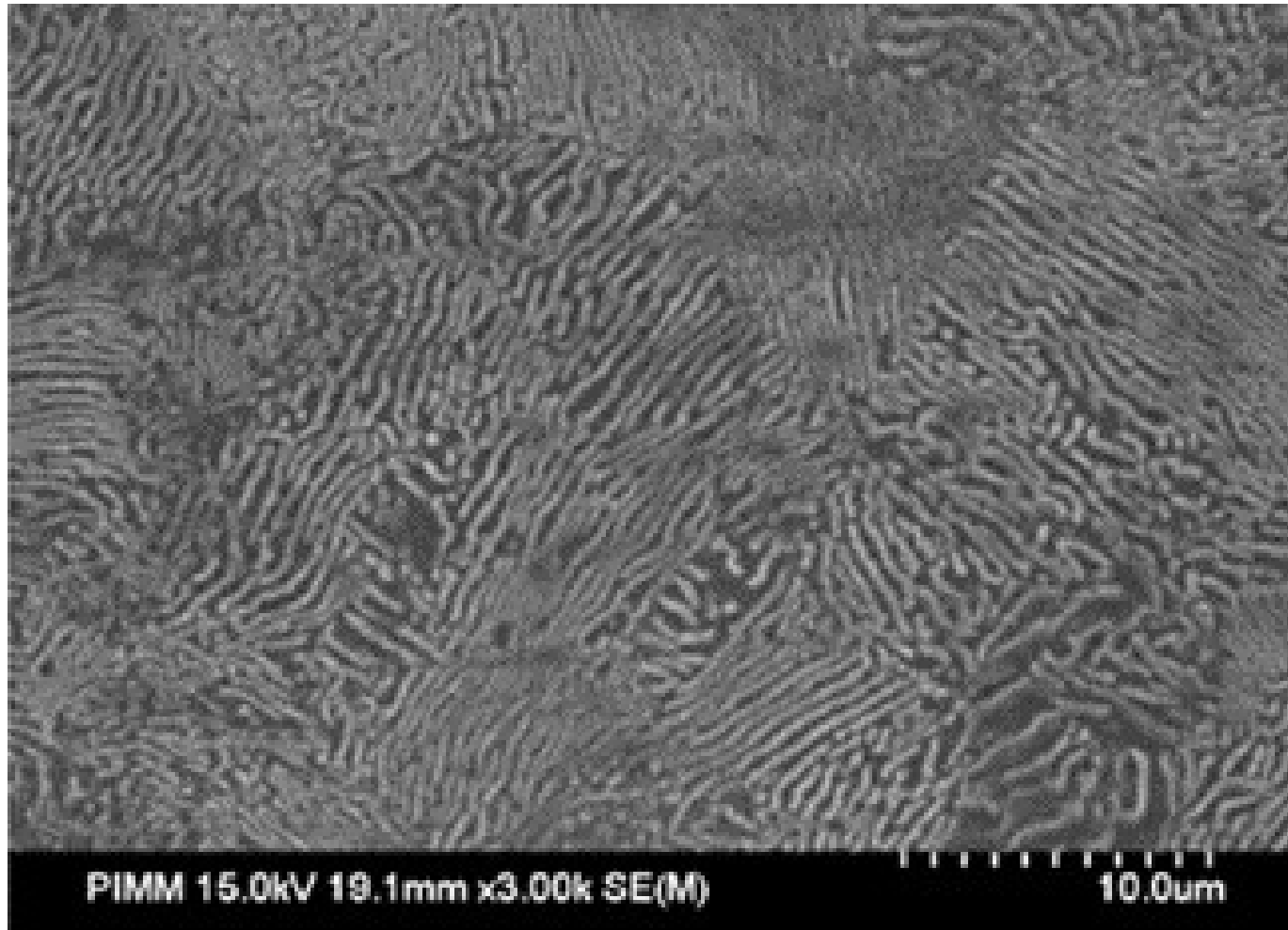
Acier ferritique (< 0,02 % (masse) C)



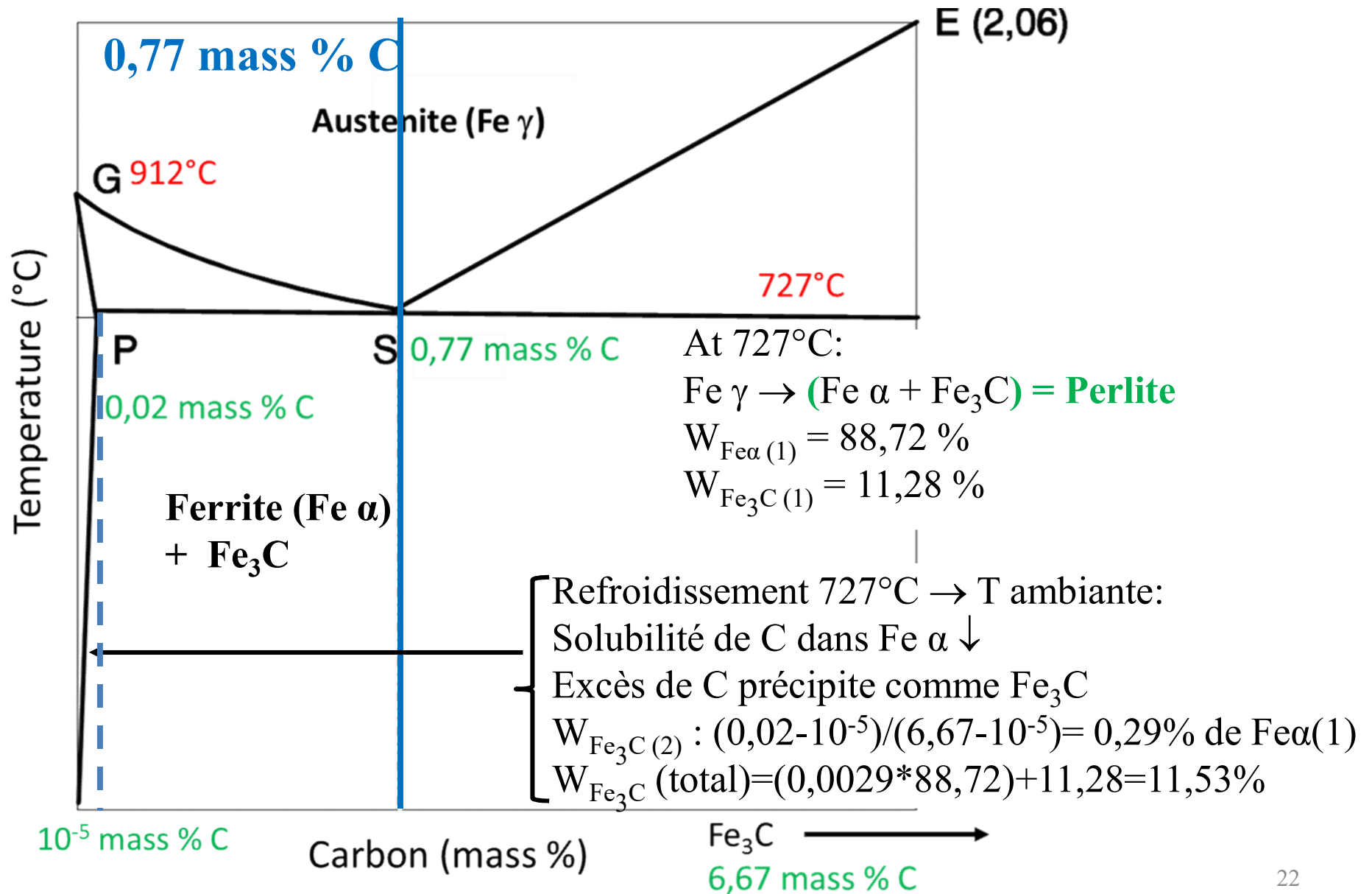
Acier eutectoïde (0,77 % (masse) C)



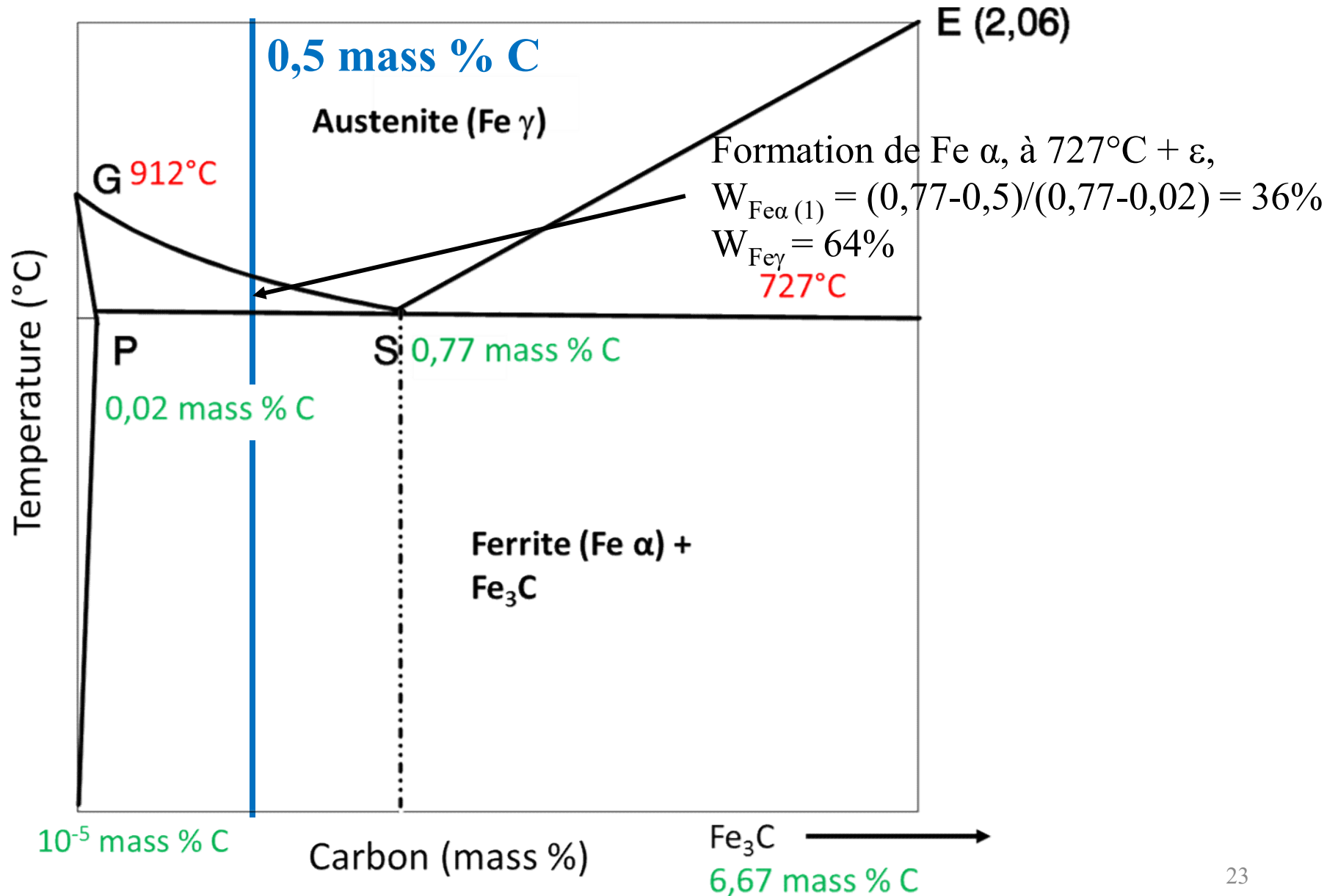
Acier eutectoïde (0,77 % (masse) C)



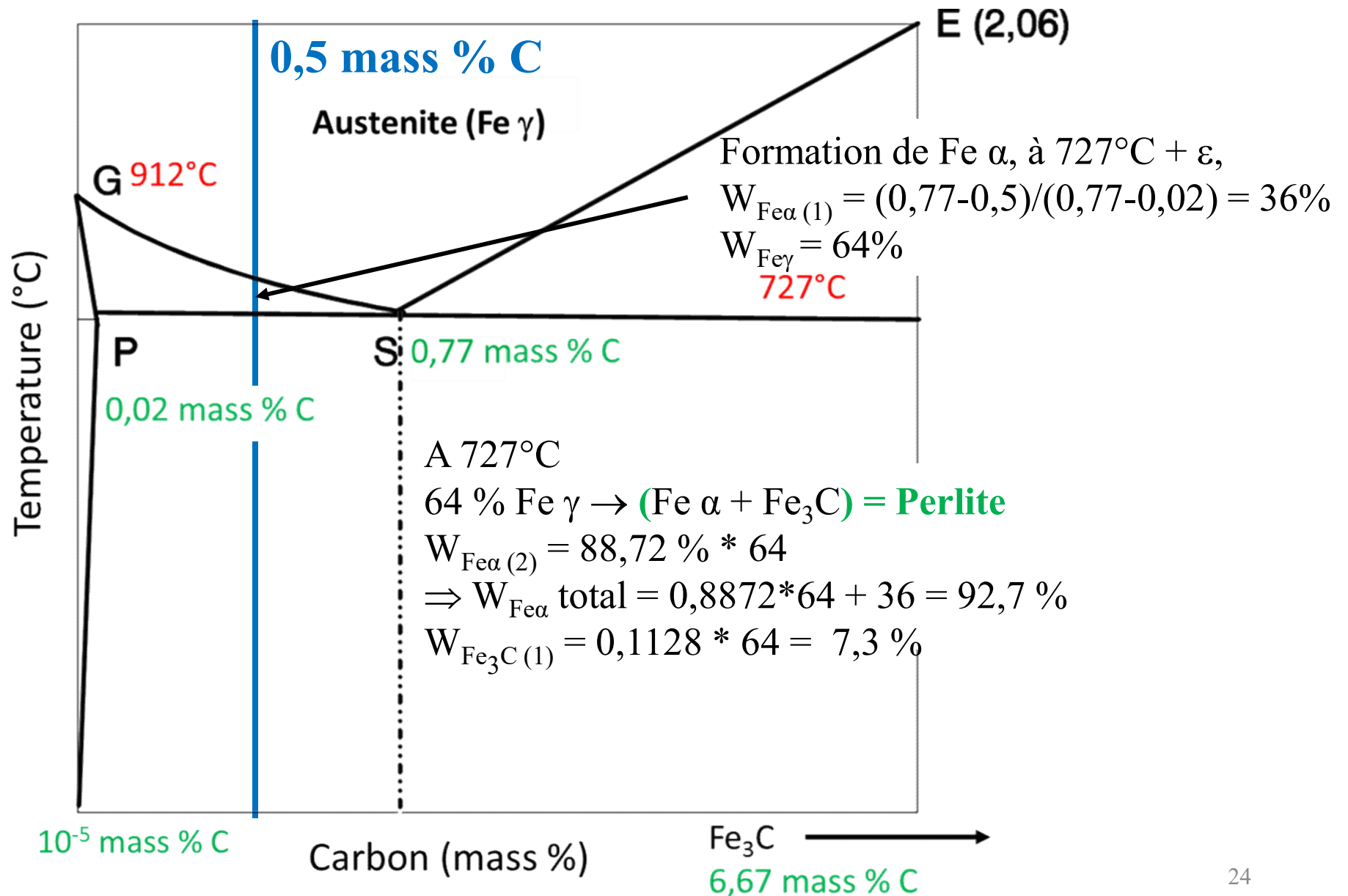
Acier eutectoïde (0,77 % (masse) C)



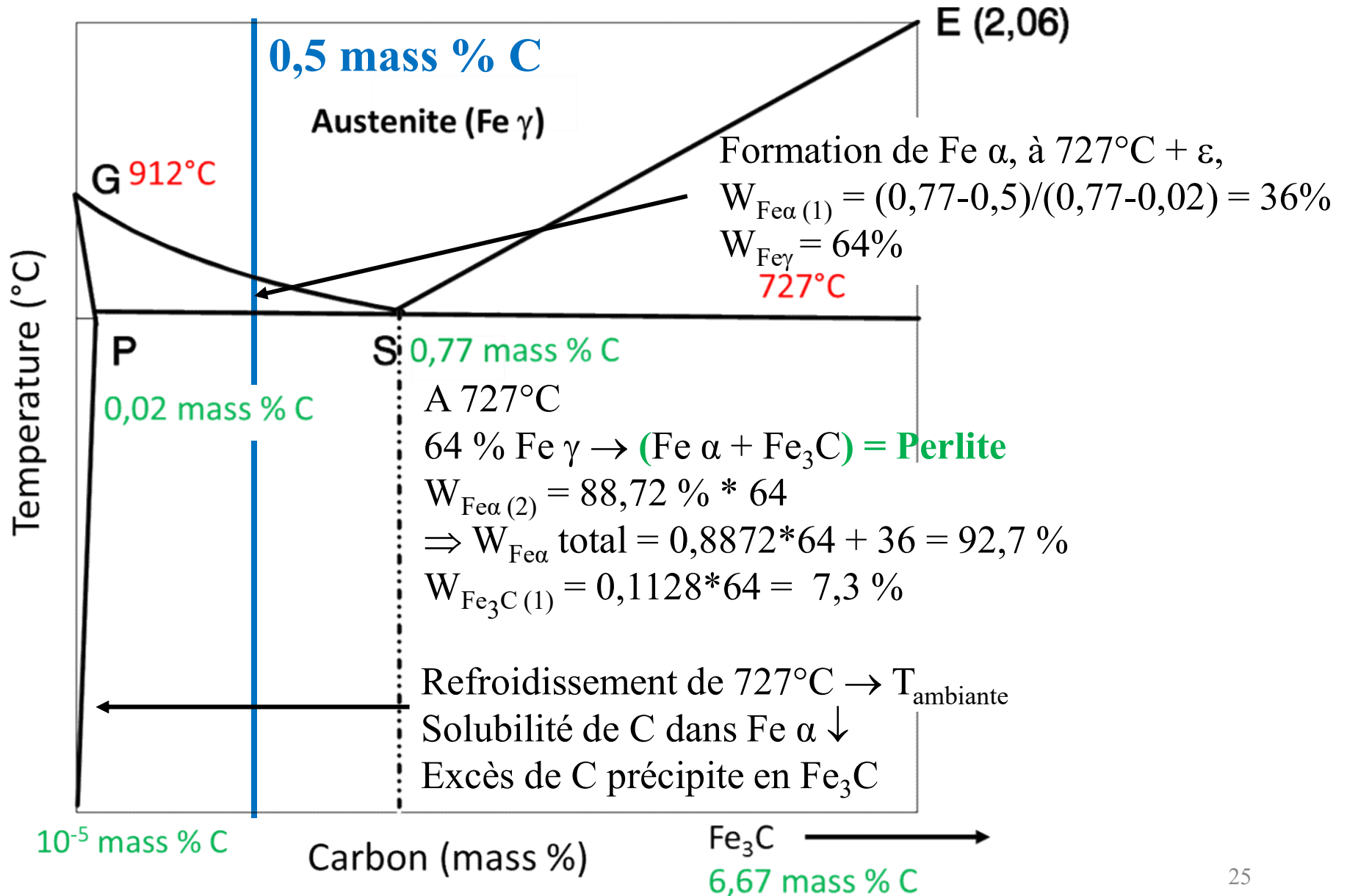
Acier hypo-eutectoïde



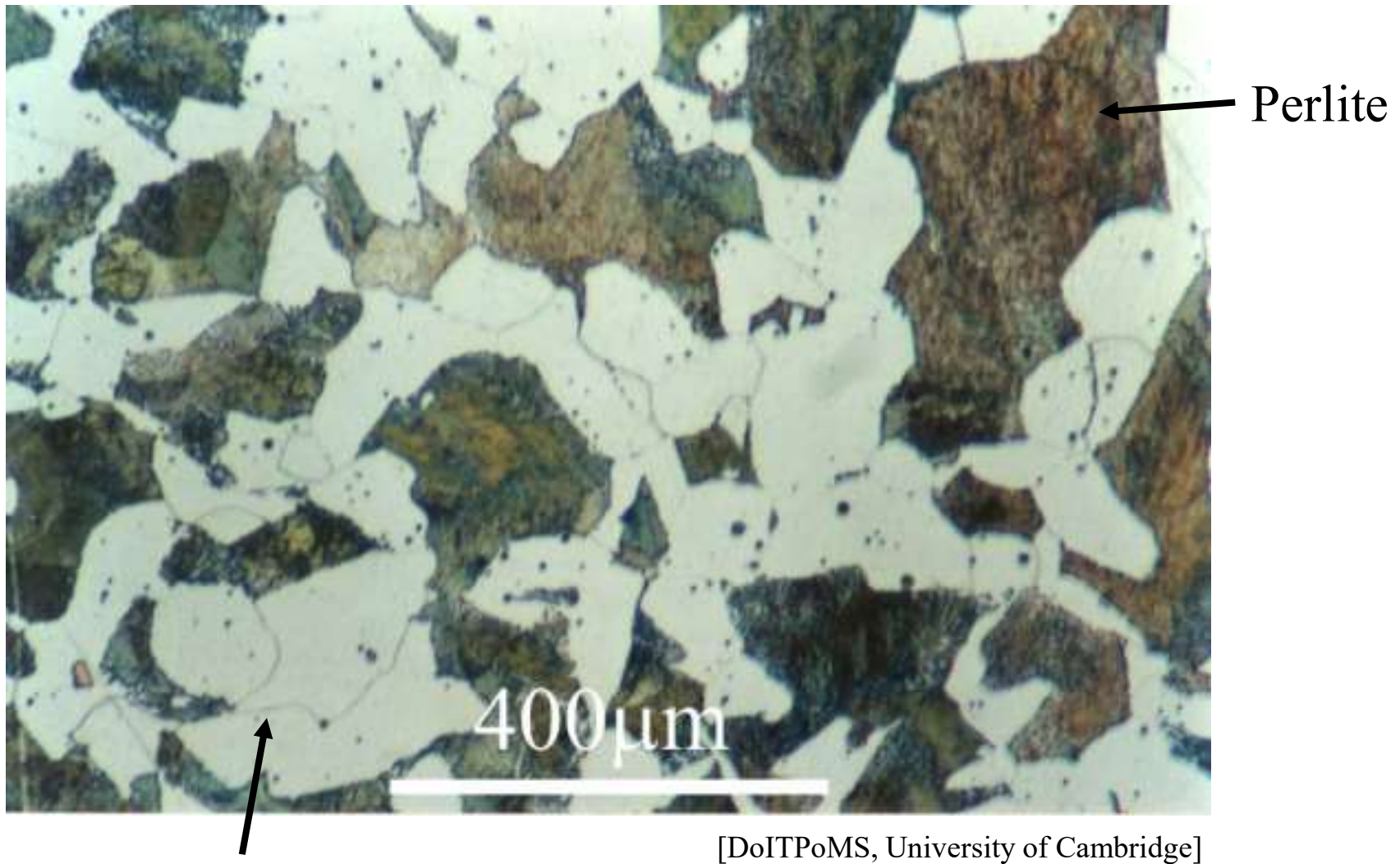
Acier hypo-eutectoïde



Acier hypo-eutectoïde

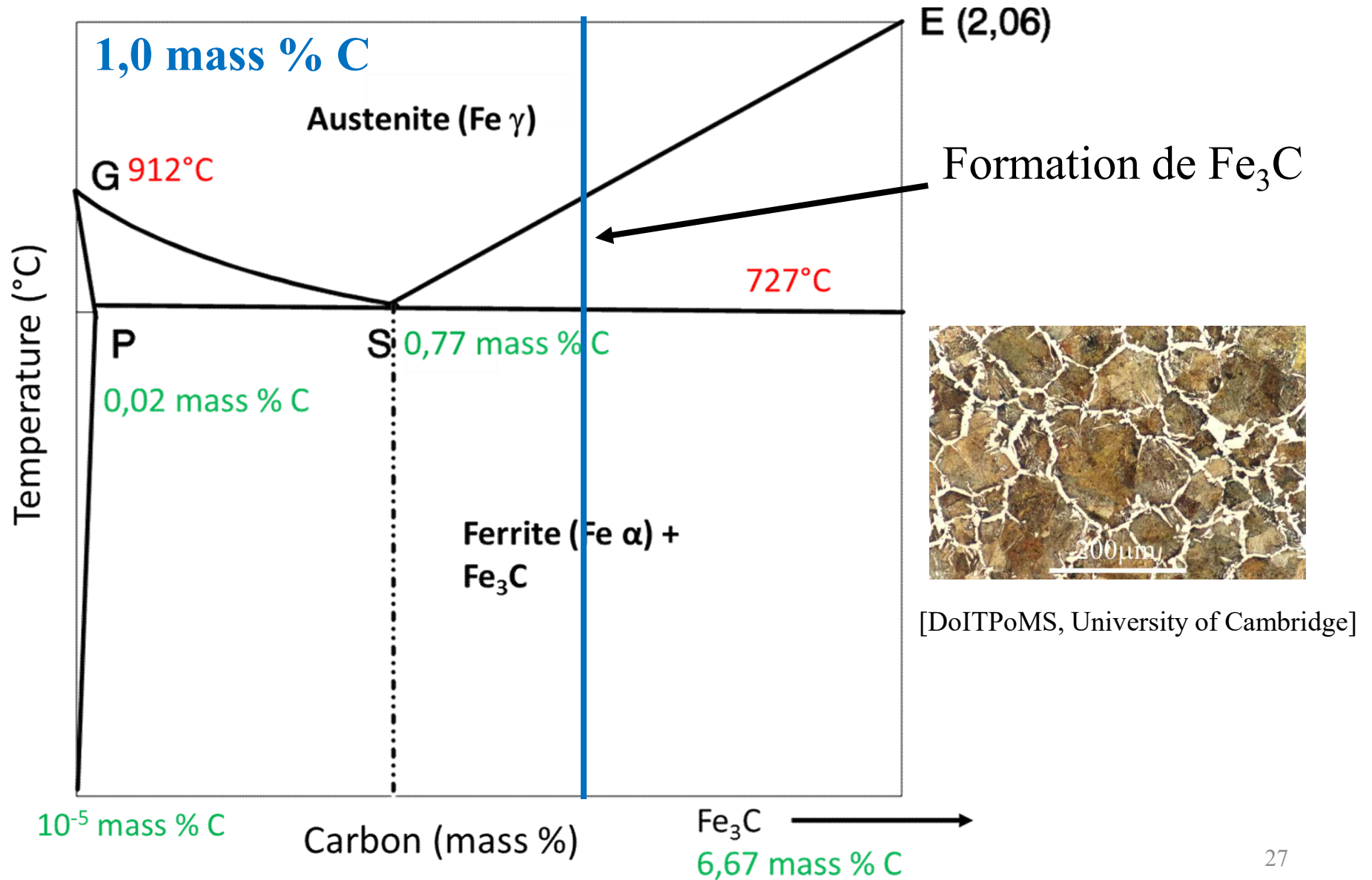


Acier hypo-eutectoïde



Fe α pro-eutectoïde

Acier hyper-eutectoïde



Propriétés mécaniques de la ferrite

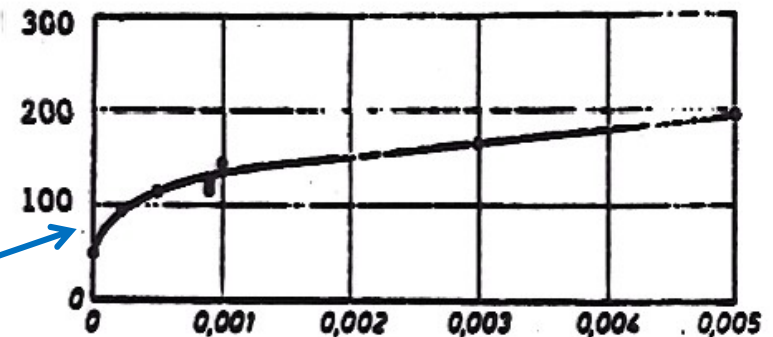
- Pour de la ferrite pure recristallisée, la loi de Hall-Petch donne:

$$\sigma = 58 + \frac{9,1}{\sqrt{d(mm)}} \text{ soit } 87 \text{ MPa pour } d=0,1 \text{ mm}$$

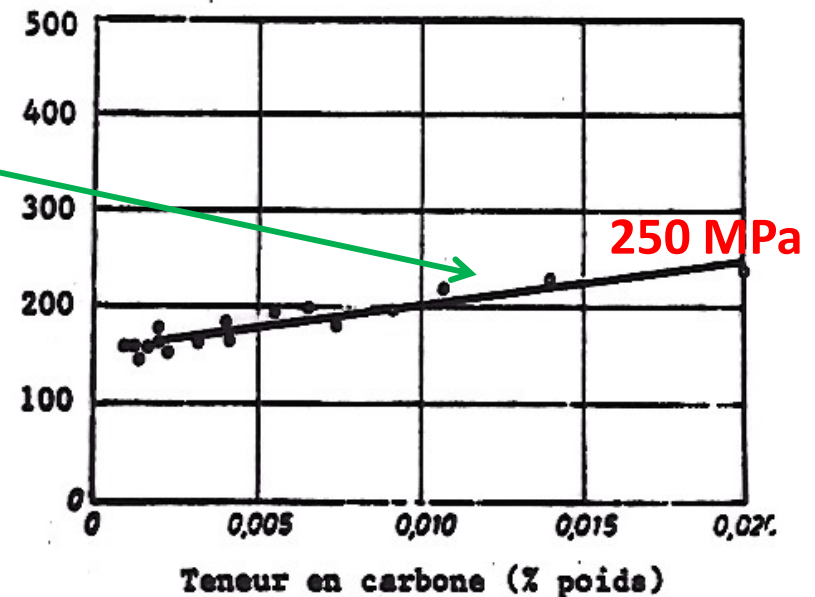
- Effet d'un ajout de C:

- Solution solide
- Précipitation (Fe_3C)

Limite élastique (Mpa)



Teneur en carbone (% poids)



Propriétés mécaniques des aciers au C

	Limite élastique (MPa)	Résistance en traction (MPa)	Allongement (%)
Ferrite	200	300	40
Perlite	350	625	20

x 2 **: 2**

- **Acier ferritique**
 - "Faible" résistance
 - Formabilité élevée
 - Convient pour emboutissage



Propriétés mécaniques des aciers au C

	Limite élastique (MPa)	Résistance en traction (MPa)	Allongement (%)
Ferrite	200	300	40
Perlite	350	625	20

x 2 **: 2**

- **Acier perlitique**

- Résistance élevée
- Ductilité acceptable
- Cordes de piano, pneus, cables pour ponts suspendus



Plan

- Les solutions solides
- Les composés intermétalliques
- Les alliages Fer-Carbone : aciers et fontes
 - Rappel : Fer pur
 - Les diagrammes de phase Fer-Carbone
 - Les aciers au carbone
 - Les aciers alliés
 - Les fontes
- Les alliages d'aluminium

Rôle des éléments d'alliage

- Conférer de nouvelles propriétés:
Résistance à la corrosion: Cr (>13 masse %)
- Amélioration des propriétés mécaniques
Résistance à l'usure, au fluage, ténacité...
(cfr Chapitre 5)
- Modification du diagramme de phase Fer-carbone
 - Formation de carbures alliés (WC, Mo₂C,...)
 - Déplacement des températures et concentrations en C correspondant aux limites de stabilité des phases.

Les aciers alliés - Éléments en solution

- Éléments en solution

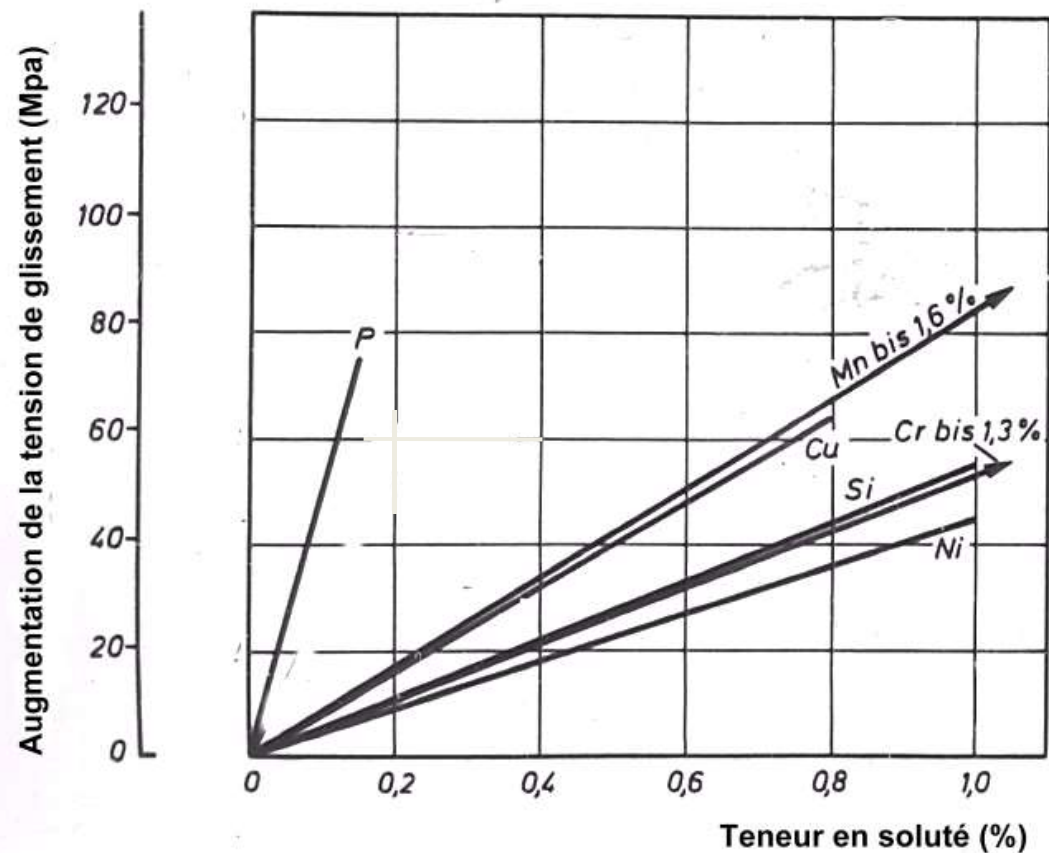
- Alphagènes

- Al
 - Si
 - Ti, Zr
 - V, Nb, Ta
 - Cr, Mo, W

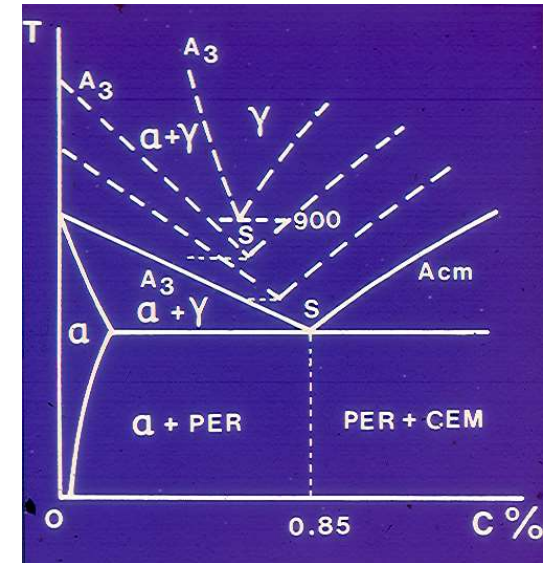
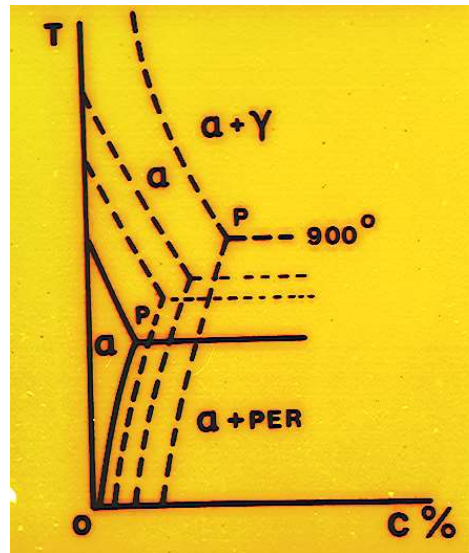
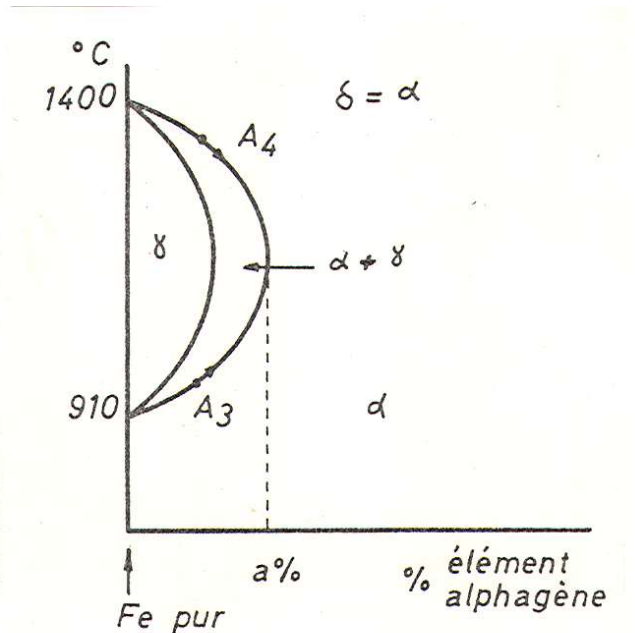
- Gammagènes

- Mn
 - Co, Ni
 - Cu

Durcissement de solution solide

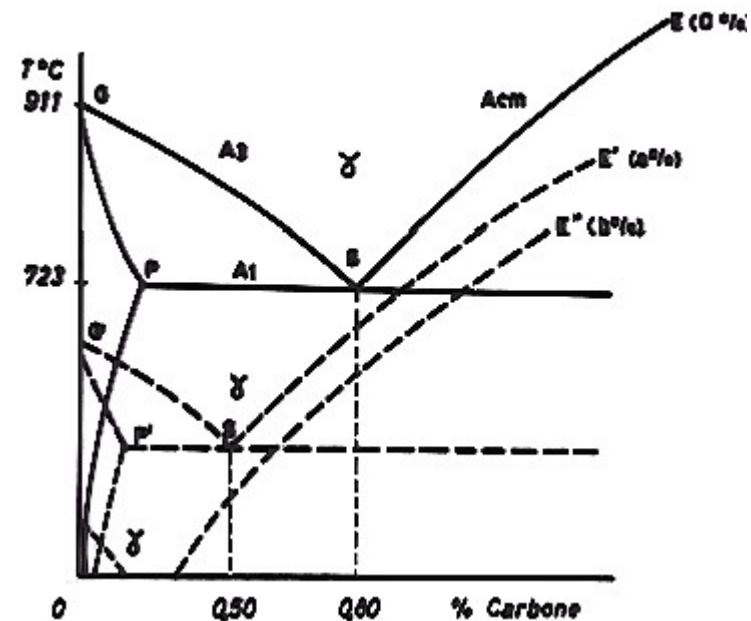
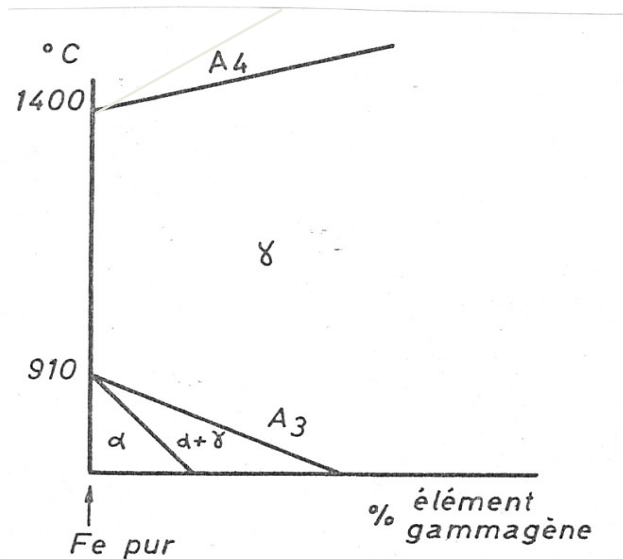


Éléments alphagènes



- Les éléments alphagènes remontent la température
 - de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$
 - eutectoïde
- Les éléments alphagènes augmentent la solubilité du carbone dans le fer α (CC)

Éléments gammagènes



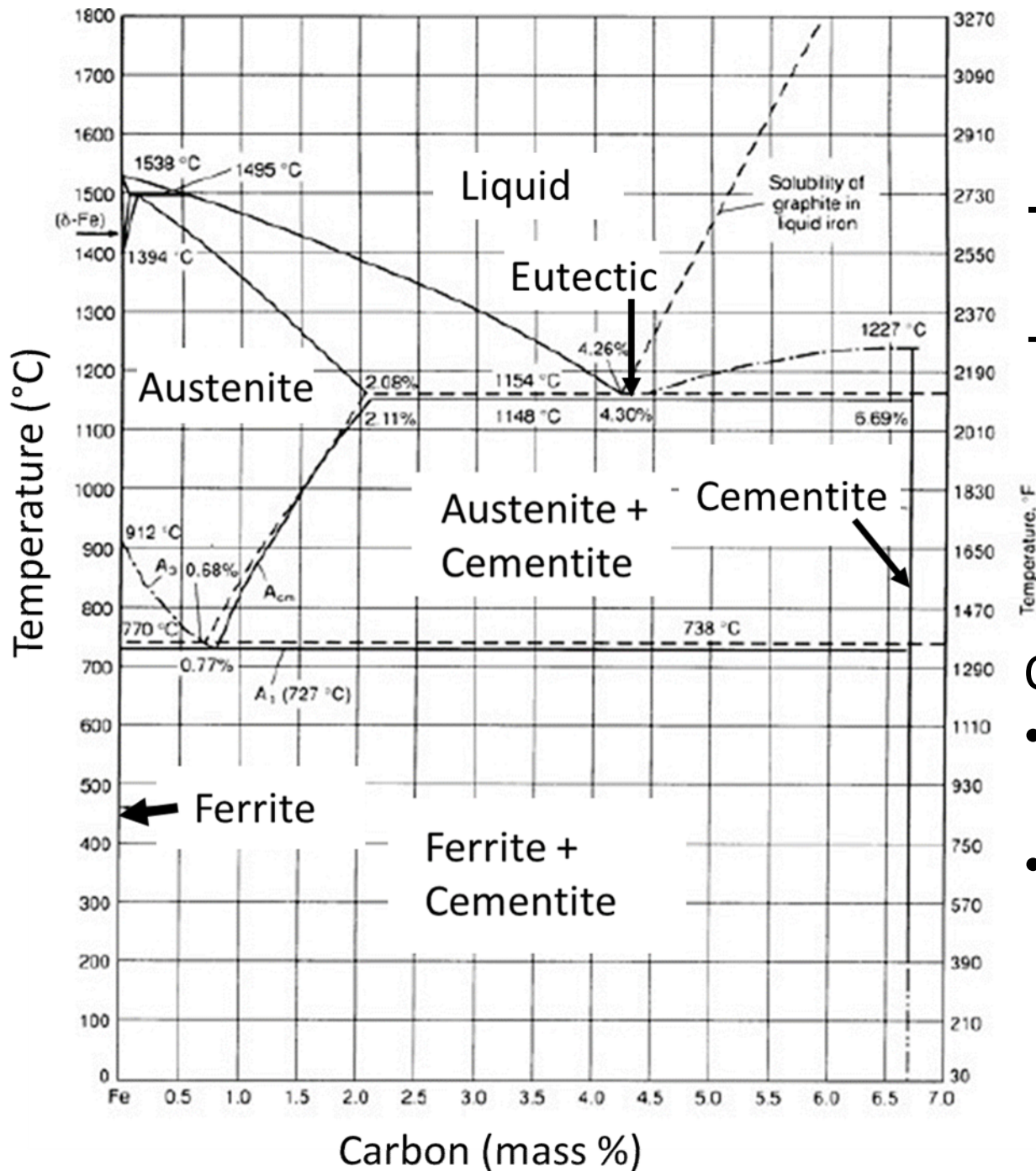
- Les éléments gammagènes abaissent la température
 - de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$
 - eutectoïde
- Les éléments gammagènes **augmentent** la solubilité du carbone dans le fer α (CC)

Combinaisons intermétalliques - carbures

- Carbures simples : TiC, ZrC, NbC, VC...
 - Carbures mixtes: (Fe, Cr)₃C...
 - Propriétés des carbures simples
 - précipitations plus abondantes, plus fines
 - plus durs (carbures de tungstène)
 - carbures plus ronds (moins de fragilité qu'avec les aiguilles)
 - Nitrures (Ti, Zr, V, Nb, Cr, Mo, W....)
 - Carbonitrures (V, Nb dans les aciers dits "micro-alliés")
- $$\Delta\sigma = c \frac{Gb f^{1/3}}{d}$$

Plan

- Les solutions solides
- Les composés intermétalliques
- Les alliages Fer-Carbone : aciers et fontes
 - Rappel : Fer pur
 - Les diagrammes de phase Fer-Carbone
 - Les aciers au carbone
 - Les aciers alliés
 - Les fontes
- Les alliages d'aluminium



Rappel : Fe + C

— Métastable, Fe-Fe₃C

- - - Stable, Fe-C graphite

Concentration en C

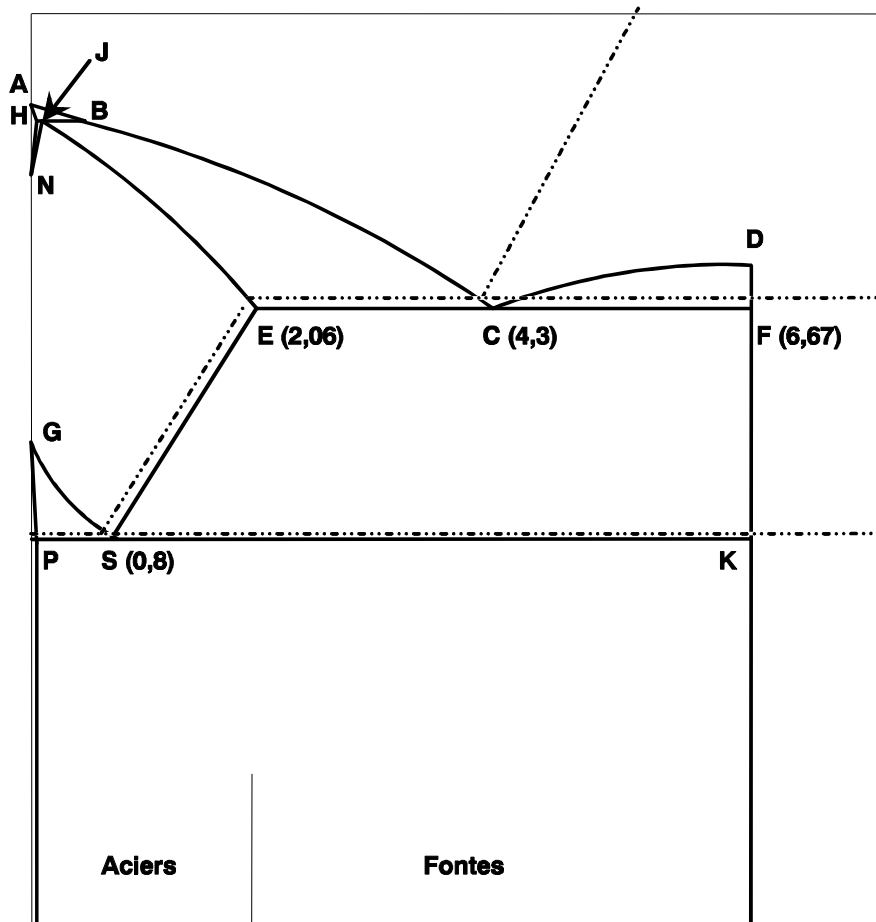
- < 2 % (masse) C: **acier**

Diagramme Fe-Fe₃C

- > 2 % (masse) C: **fonte**

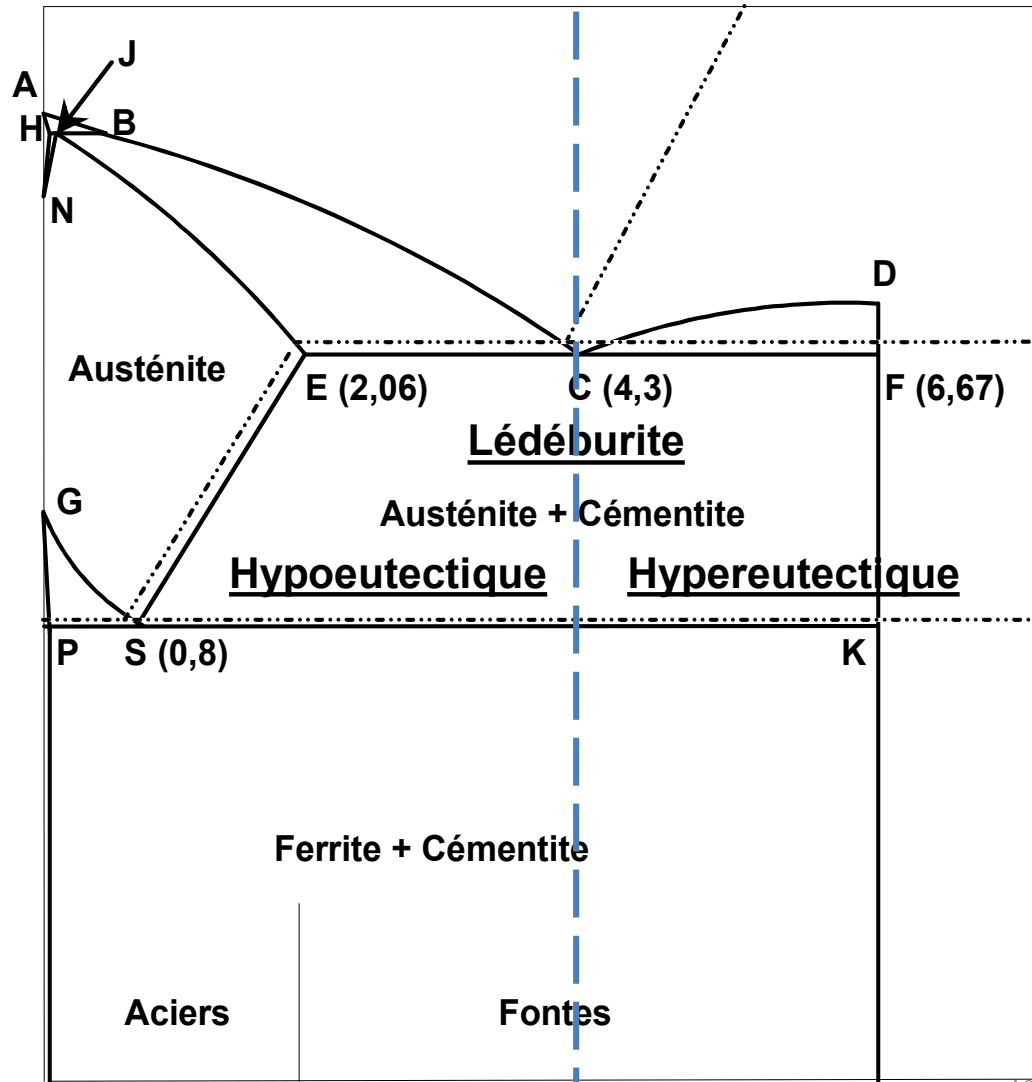
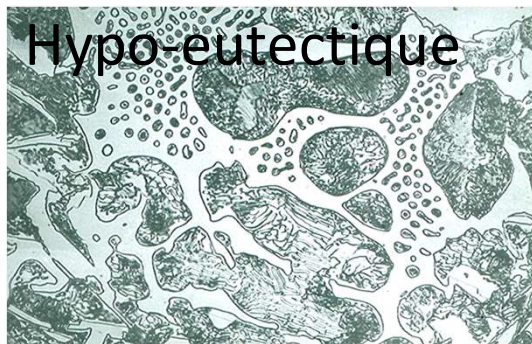
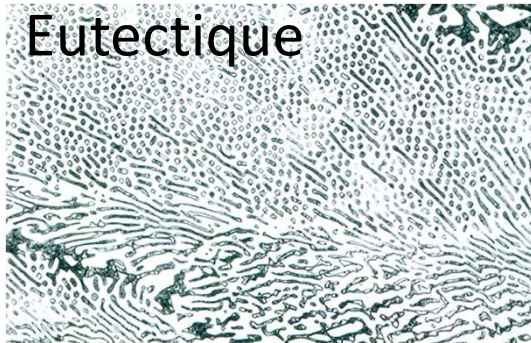
Diagramme Fe-Fe₃C **ou**
diagramme Fe-graphite

Les 3 types de fontes



1. Fontes **blanches**:
Fer - Fe_3C
2. Fontes **malléables**:
Solidification: Fer - Fe_3C
Traitement ensuite pour revenir
à une structure Fer - graphite
3. Fontes **grises**:
Solidification: Fer-graphite
Transformations allotropiques
au refroidissement :
Fer - Fe_3C

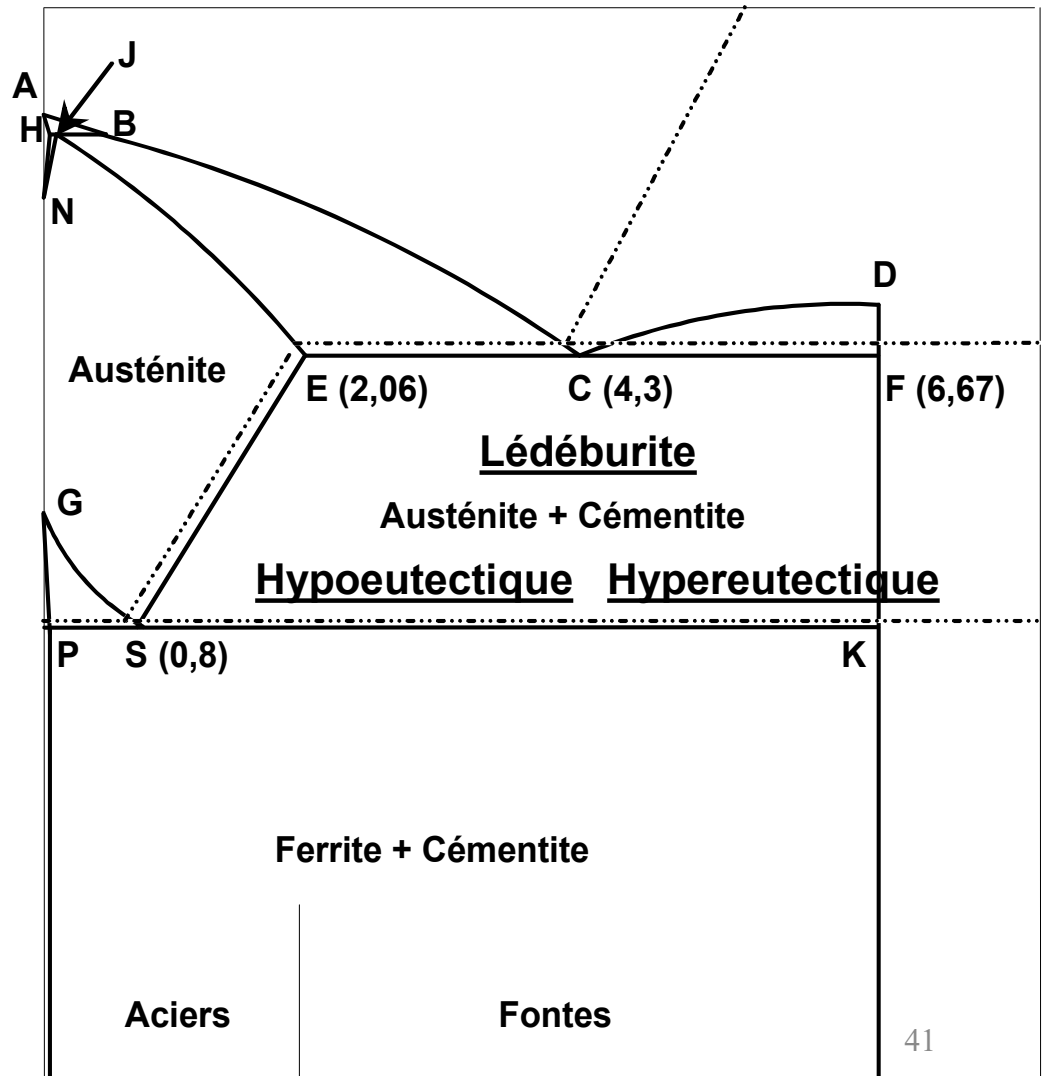
Les Fontes Blanches



Les Fontes Blanches

Comment les obtenir?

- Refroidissement rapide
- Pas d'éléments d'alliage graphitisants
- Présence de stabilisateurs de cémentite (Mn)



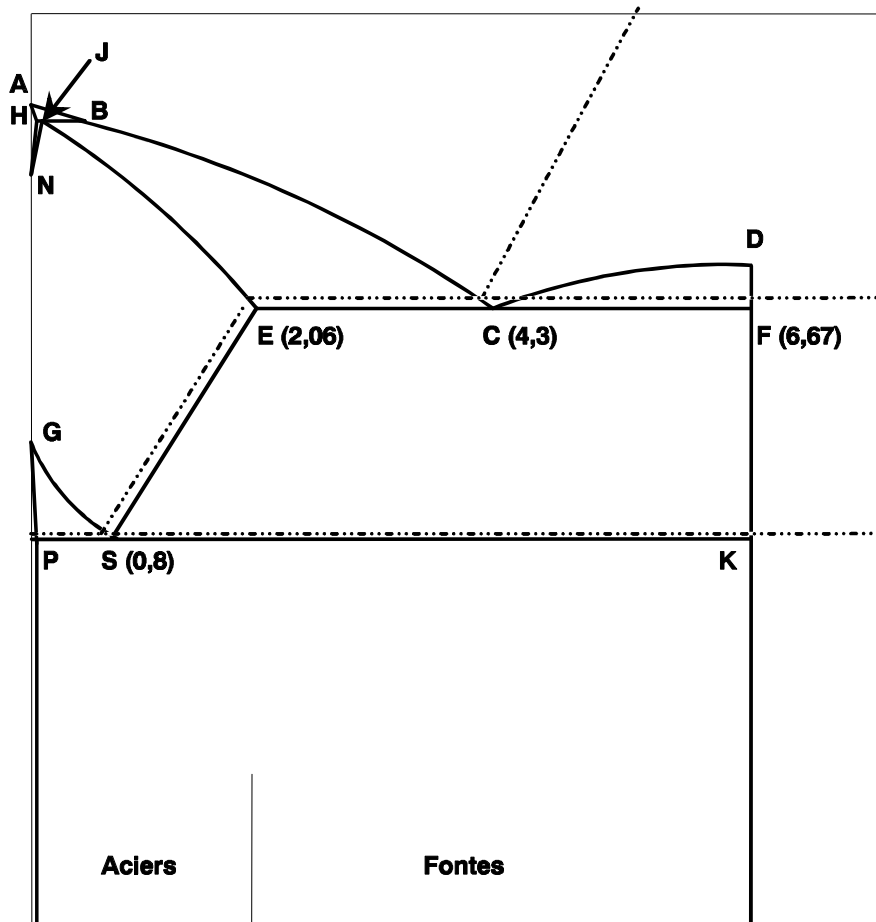
Propriétés des fontes blanches

Majoritairement constituées de cémentite (pro-eutectique, dans la lédéburite et dans la perlite), elles sont

- dures
- fragiles

Utilisées en surface des pièces soumises à usure.

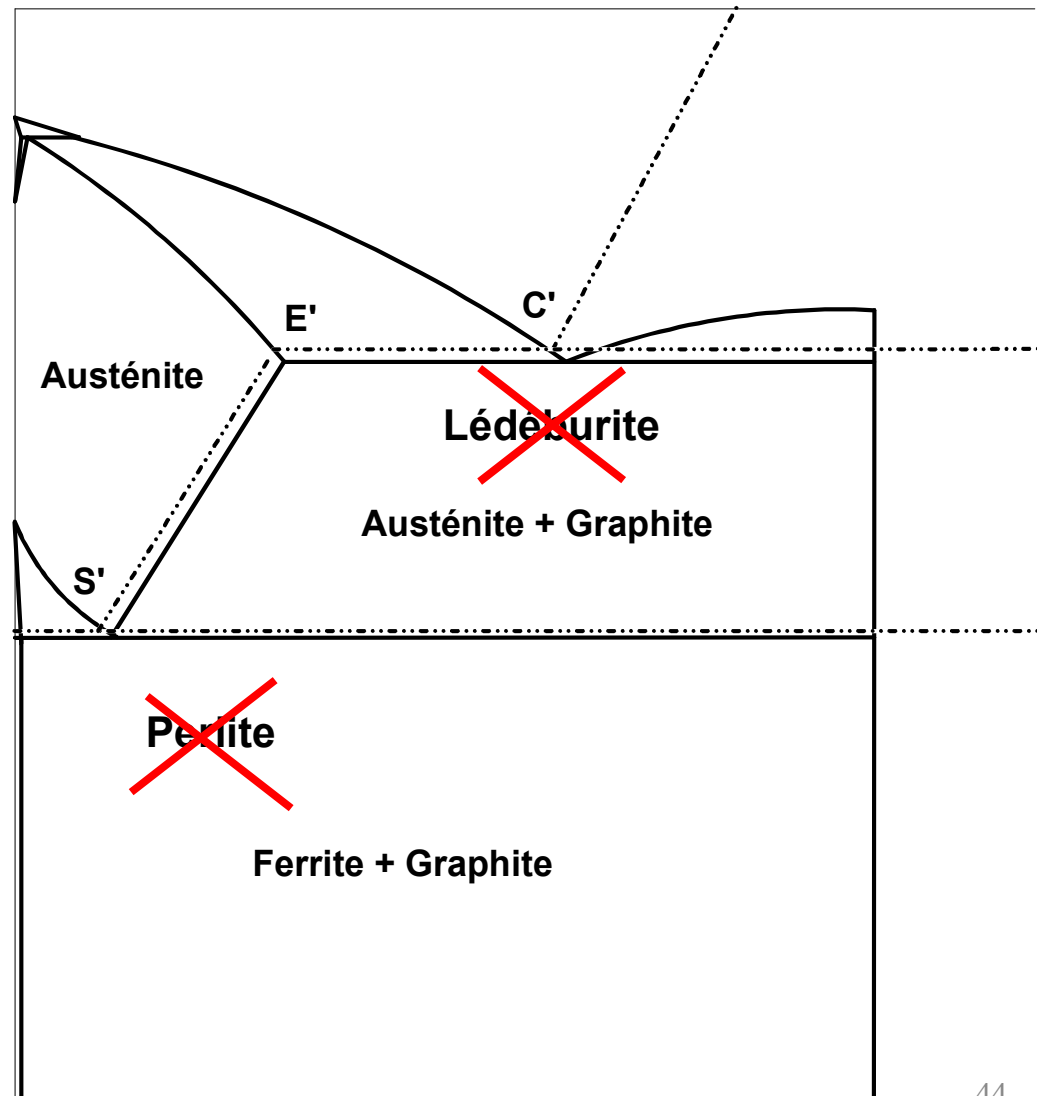
Les 3 types de fontes



1. Fontes **blanches**:
Fer - Fe_3C
2. Fontes **malléables**:
Solidification: Fer - Fe_3C
Traitement ensuite pour revenir
à une structure Fer - graphite
3. Fontes **grises**:
Solidification: Fer-graphite
Transformations allotropiques
au refroidissement :
Fer - Fe_3C

Les fontes malléables

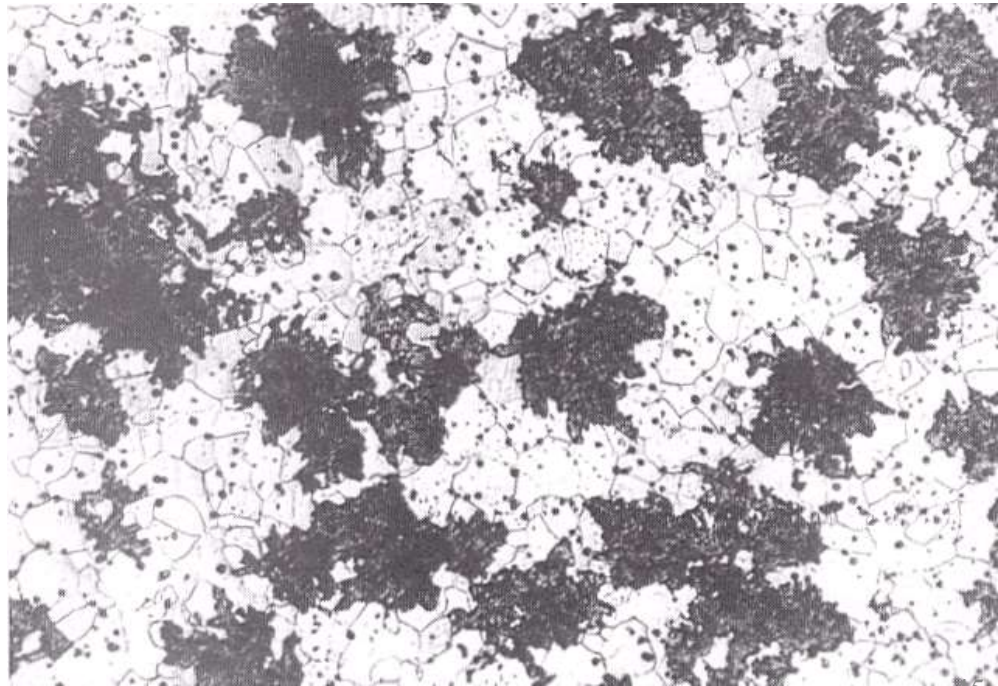
- Structure finale suivant le diagramme fer-graphite
- Ne sont pas produites directement
- On produit une fonte blanche et on effectue ensuite un traitement thermique = « mise à l'équilibre » de la fonte blanche



Les Fontes malléables

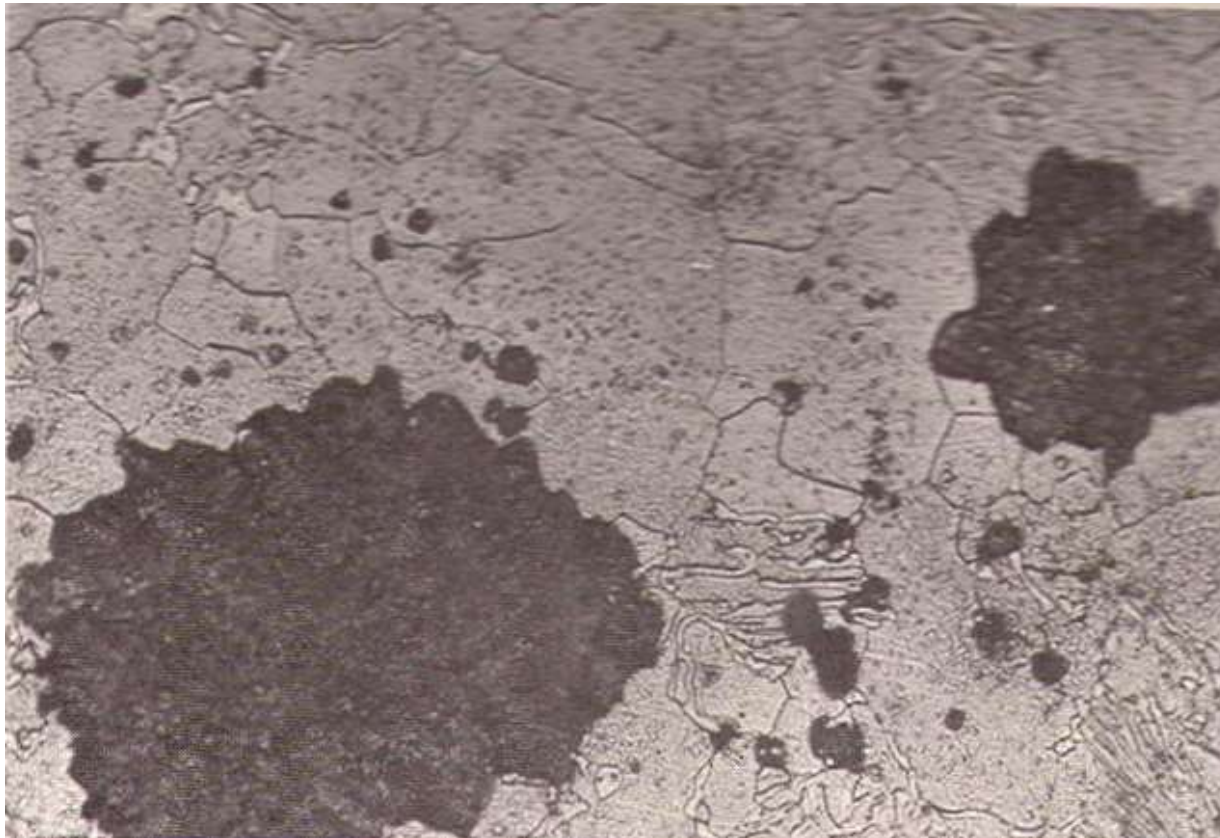
Procédé américain

- Décomposition cémentite à 950°C : $\text{Fe}_3\text{C} \xrightarrow{\text{M}} 3 \text{Fe}_\gamma + \text{C}_{\text{graphite}}$
- Refroidissement très lent 10°C/h puis 1°C/h
- Résultat : ferrite + graphite



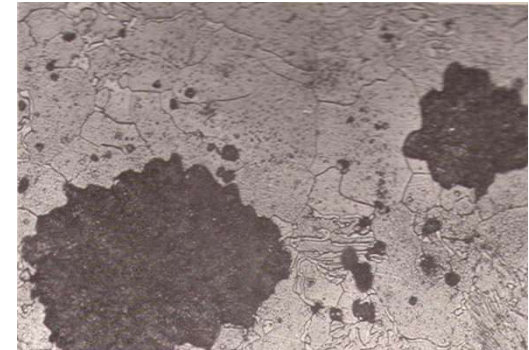
Les Fontes malléables

- Résultat : ferrite + graphite
- Défauts : présence de cémentite et/ou de perlite



Propriétés mécaniques des fontes malléables

- La microstructure est constituée
 - majoritairement: ferrite
 - minoritairement: amas de graphite



	Résistance (MPa)	Allongement (%)	Dureté (Brinell)
Ferrite (+ solutés)	300	40	80
Fonte malléable américaine	275-300	6-18	110-160

- La dispersion des propriétés peut être liée à la présence d'impuretés, de défauts...

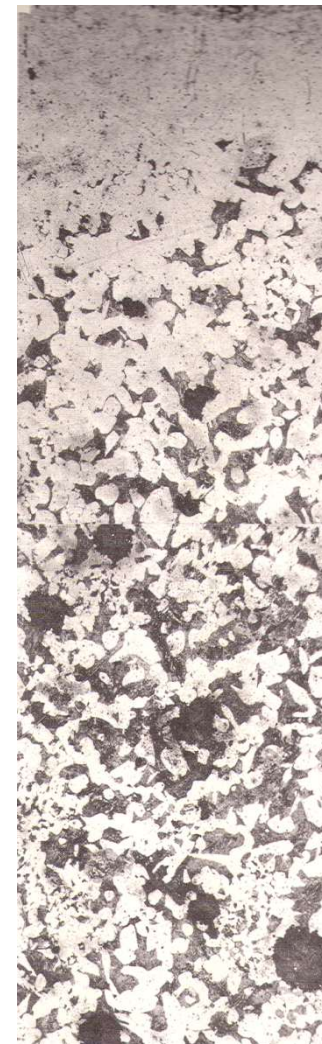
Les Fontes malléables européennes

Procédé européen

- Décomposition cémentite à 950°C sous atmosphère oxydante



- Refroidissement plus rapide
- Produit hétérogène :
 - Surface: ferrite
 - Coeur : ferrite + graphite
(+ cémentite et/ou perlite)



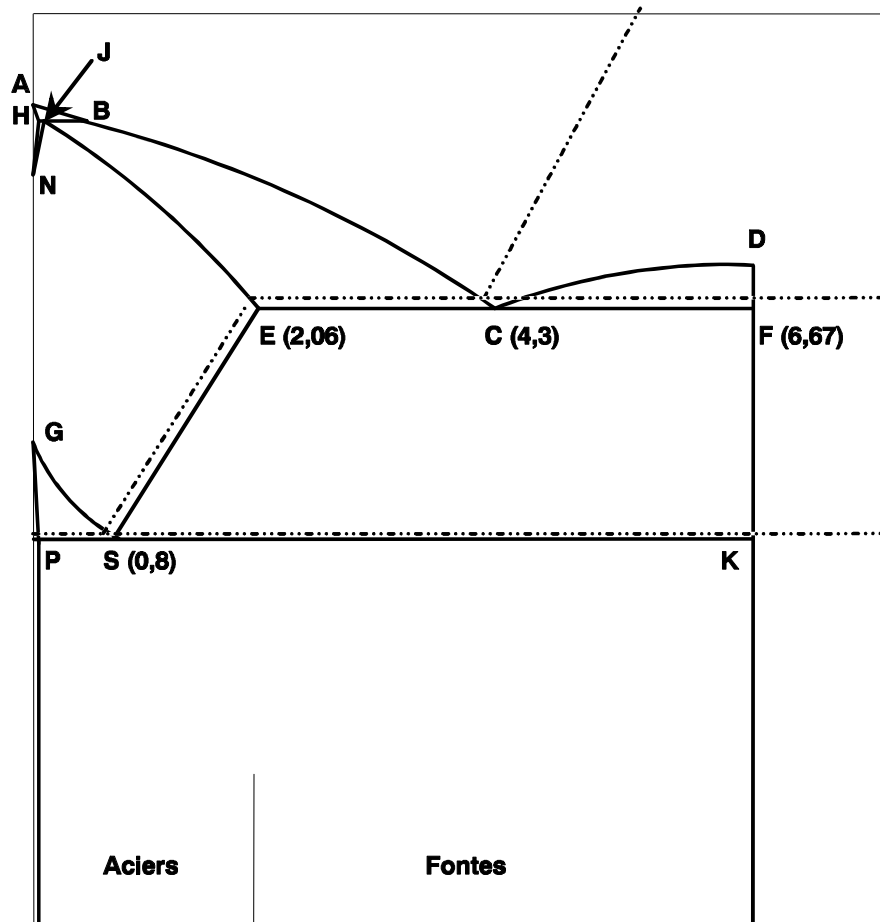
100x

Propriétés mécaniques des fontes malléables

	Résistance en traction (MPa)	Allongement (%)	Dureté (Brinell)
Ferrite (+ solutés)	300	40	80
Fonte malléable américaine	275-300	6-18	110-160
Fonte malléable européenne	300-375	5	Surface: 100-130 Coeur: 150-200

Le procédé européen est principalement utilisé pour des pièces peu épaisses

Les 3 types de fontes



1. Fontes **blanches**:

Fer - Fe₃C

2. Fontes **malléables**:

Fer - graphite

3. Fontes **grises**:

Solidification: Fer-graphite

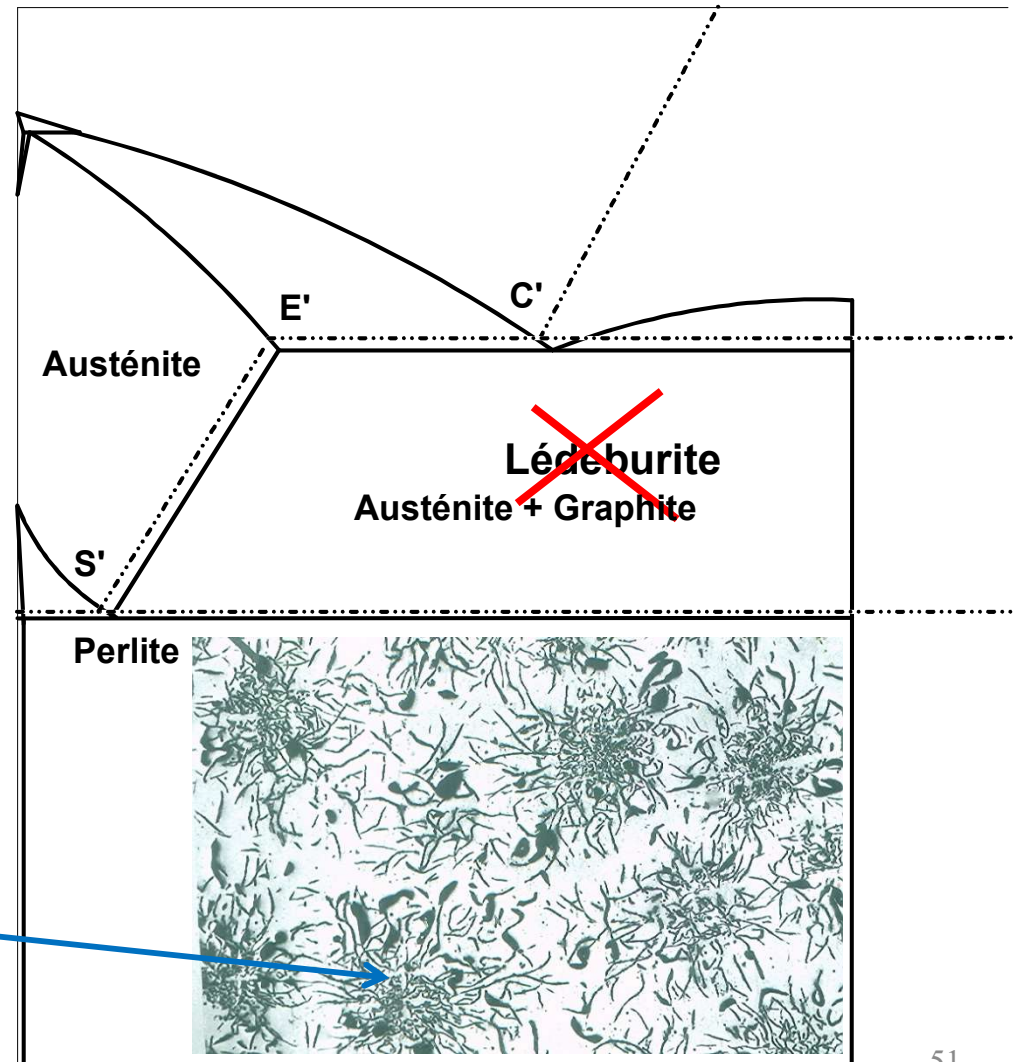
Transformations allotropiques:

Fer - Fe₃C

Les fontes grises.

Solidification dans le diagramme stable

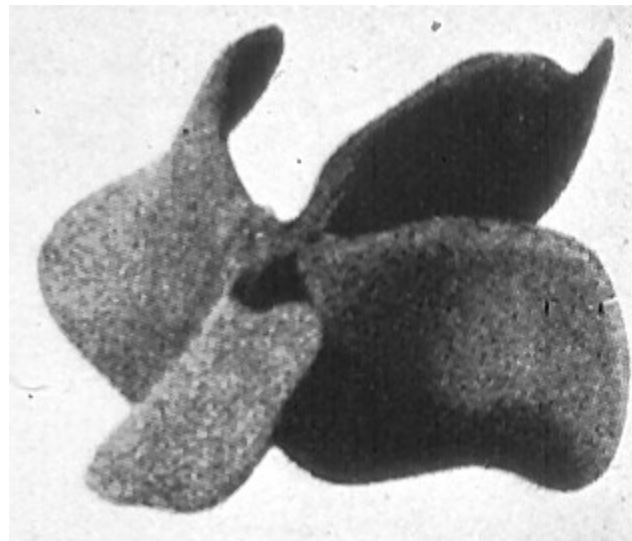
- Température de coulée élevée.
- Refroidissement lent.
- Ajout d'éléments graphitisants (C, Si...).
- Pas de stabilisateurs de cémentite.



Les fontes grises – rosettes de graphite

Rosettes de graphite

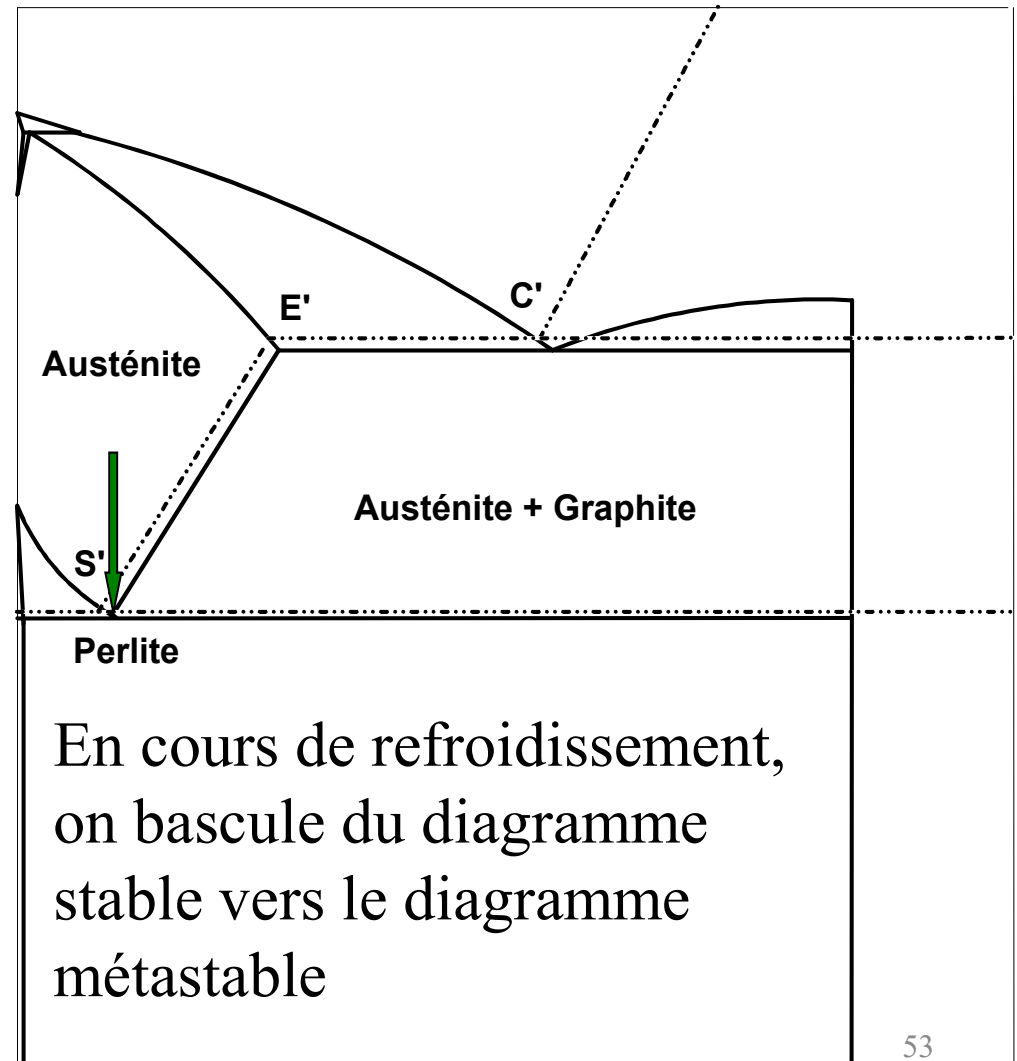
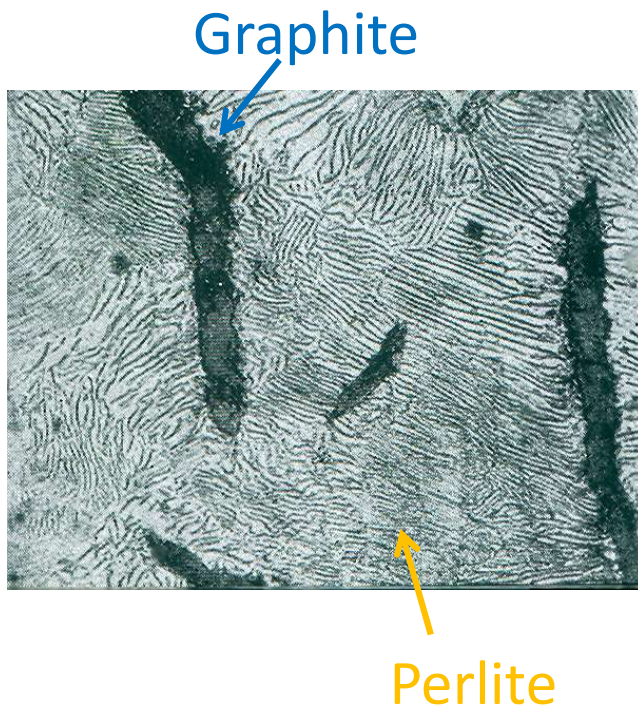
- Graphite lamellaire
- Lamelles entrelacées



Les fontes grises.

Transition entre diagrammes

Graphite + Perlite
Fonte grise perlitique



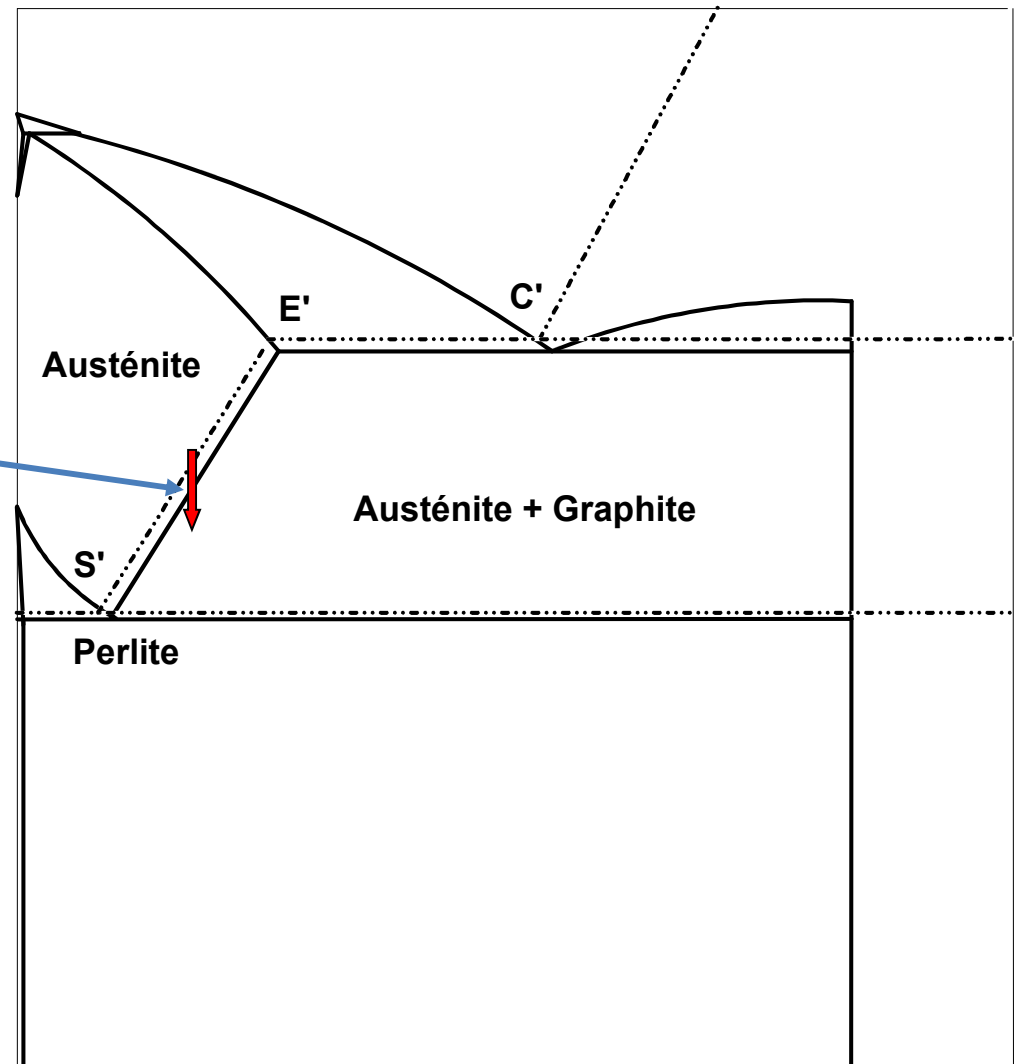
Les fontes grises.

Transition entre diagrammes

Graphite + Perlite +
Cémentite proeutectoïde

La solubilité du C dans γ
diminue quand $T \downarrow$

Le C excédentaire
précipite d'abord comme
C graphite, puis comme
cémentite Fe_3C

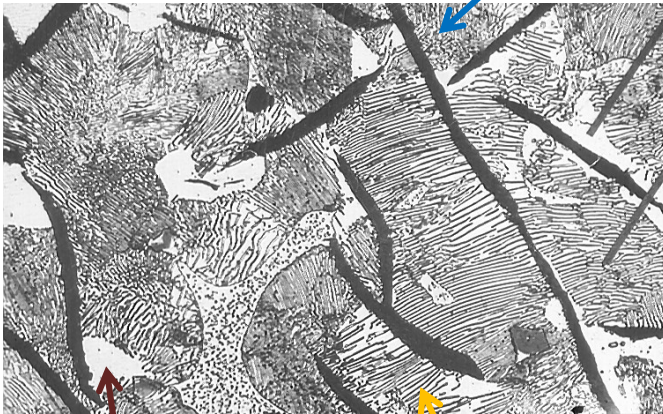


Les fontes grises.

Transition entre diagrammes.

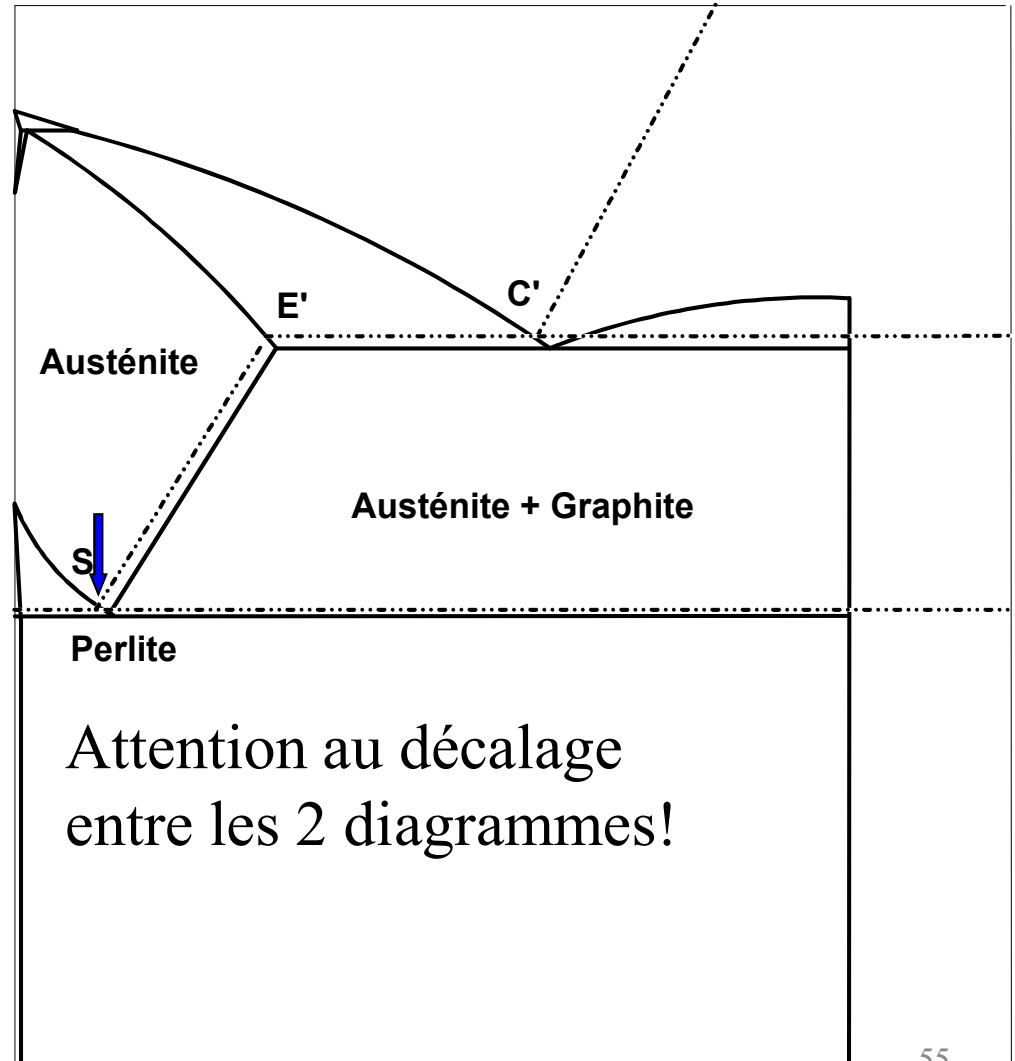
Graphite + Perlite +
Ferrite proeutectoïde

Graphite



Ferrite
pro-eutectoïde

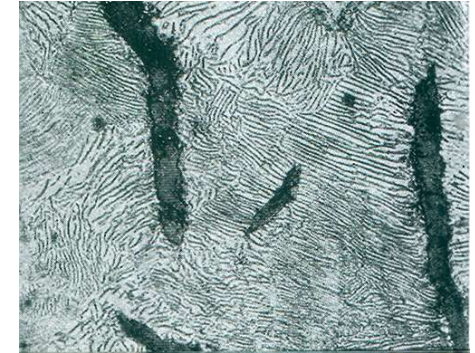
Perlite



Propriétés des fontes grises perlitiques.

Les fontes grises perlitiques sont constituées

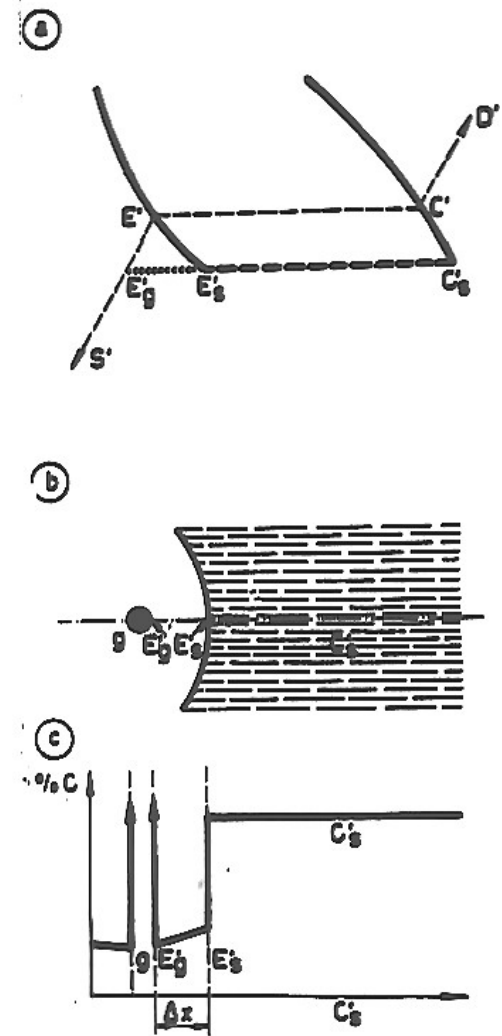
- majoritairement: perlite
- minoritairement: graphite lamellaire



	Résistance en traction (MPa)	Allongement (%)	Résilience (J/cm ²)
Perlite	850	15	200
Fonte grise perlitique (lamellaire)	275-300	0-1	Médiocre
Fonte grise perlitique (nodulaire)	400-700	4-5	Bonne

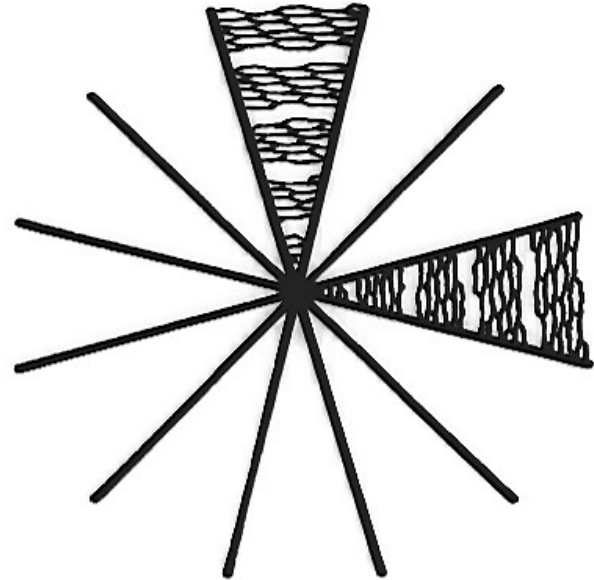
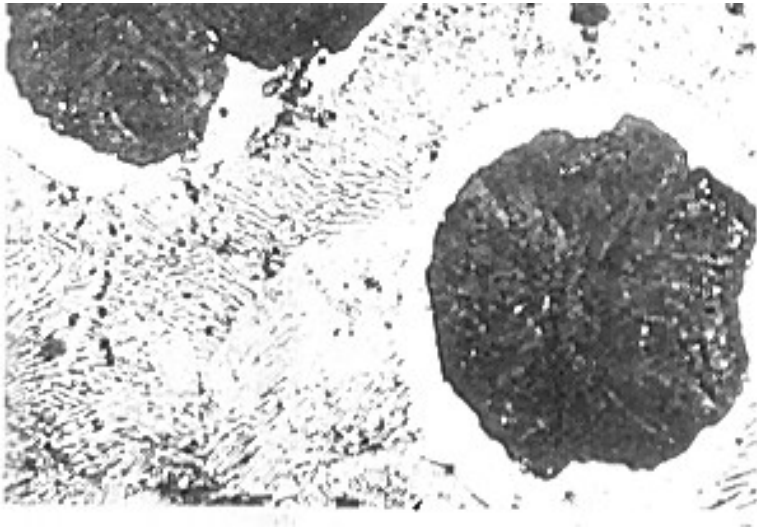
Fabrication des fontes grises nodulaires.

- Elles sont réalisables au partir de fontes hypoeutectiques en empêchant la formation de l'eutectique :
empoisonnement des germes (par exemple par Mg)
- Il se produit une surfusion (existence d'un liquide en-dessous de la température de solidification)
- On forme ainsi de l'austénite sursaturée en carbone
- Cette austénite se désature en donnant naissance à des nodules de graphite.



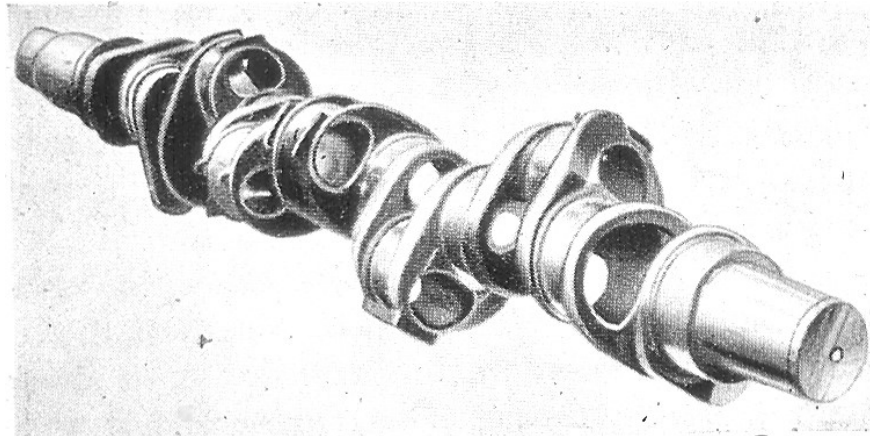
Fabrication des fontes grises nodulaires.

- Les nodules de graphite sont constitués d'un amas de petites lamelles de graphite orientées perpendiculairement aux rayons du nodule.
- Ceci résulte de leur formation dans un solide avec diffusion dans toutes les directions.



Utilisation des fontes grises nodulaires.

- Outre de bonnes propriétés mécaniques, les fontes grises nodulaires présentent:
 - une bonne usinabilité (lubrification par le graphite)
 - une bonne étanchéité
 - une bonne résistance aux chocs thermiques
- Elles sont très utilisées en mécanique

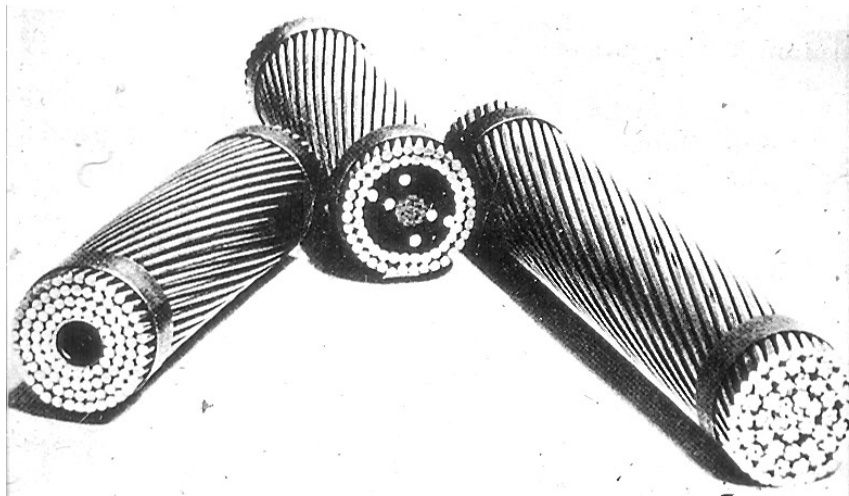


Plan

- Les solutions solides
- Les composés intermétalliques
- Les alliages Fer-Carbone : aciers et fontes
- Les alliages d'aluminium

Aluminium

- Structure cubique faces centrées (CFC)
- Point de fusion 660°C
- Masse volumique 2700 kg/m³
- Bon conducteur de la chaleur et de l'électricité.



Aluminium

- Métal très réactif.
- Bonne passivation par Al_2O_3 dans des conditions favorables
→ Anodisation



[<http://www.pobot.org/Anodisation-et-coloration-de-l.html>]

Aluminium

- Métal très réactif.
- Bonne passivation par Al_2O_3 dans des conditions favorables
- Utilisations: électro-ménager, bâtiment...



Propriétés mécaniques de l'aluminium

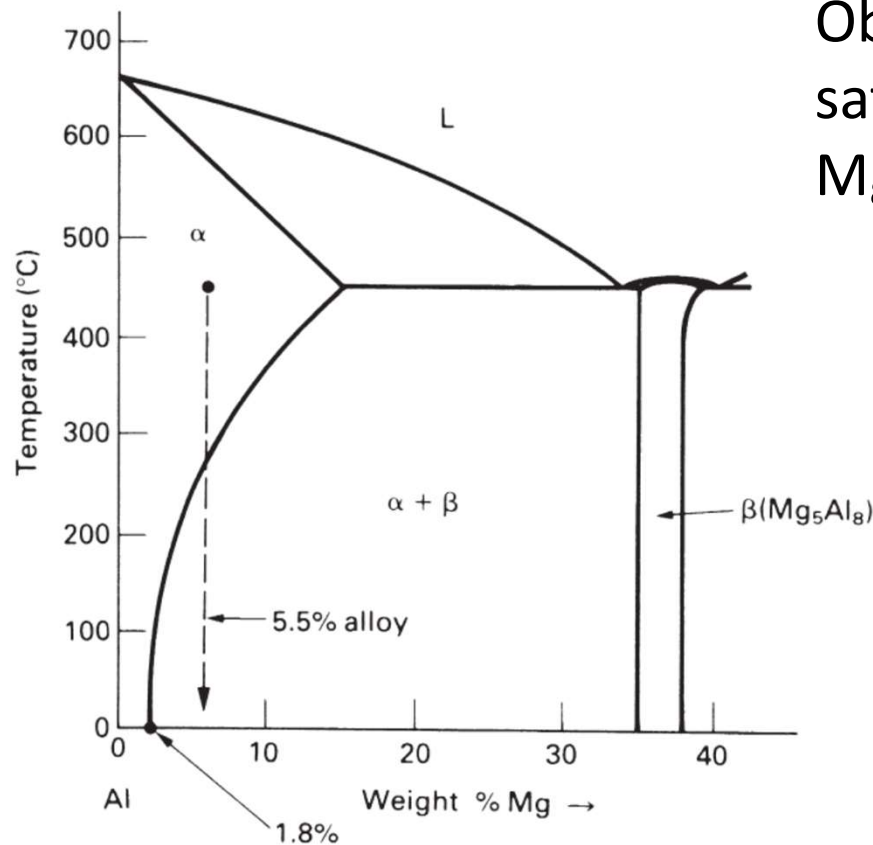
	Limite élastique (MPa)	Résistance en traction (MPa)	Allongement (%)
Ferrite (pure)	100	200	50
Ferrite (+ solutés)	200	300	40
Al (pur)	10	50	60
Al (+ solutés)	35	90	35
Al (+ solutés) à 150°C	30	60	45

**Durcissement de
solution solide**

$$\sum_{i=2}^n a_i [\%i]$$

Durcissement par solution solide

- Alliages Al-Mg (série 5xxx)



Obtention d'une solution super-saturée jusqu'à 5,5 % (masse) de Mg

1. Mise en solution à 450°C
2. Refroidissement rapide jusqu'à T_{ambiante} (en-dessous de 275°C)

Durcissement en solution solide

- Alliages Al-Mg (série 5xxx)

Table 10.3 Yield strengths of 5000 series (Al-Mg) alloys

<i>Alloy</i>	<i>wt% Mg</i>	σ_y (MPa) <i>(annealed condition)</i>
5005	0.8	40
5050	1.5	55
5052	2.5	90
5454	2.7	120
5083	4.5	145
5456	5.1	160

} supersaturated

σ_y ↑↑

Renforcement des propriétés de l'aluminium.

$$R_e = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} + \sum_i a_i [A_i \text{‰}] + \alpha G b \sqrt{\rho} + \sum_j \frac{c_j G b (f_j)^{1/3}}{d_j}$$

Taille de grains
(Hall-Petch)
(cfr chapitre 3)

Durcissement de
solution solide

Ecrouissage
(cfr chapitre 3)

Durcissement de précipitation
→ Optimisé par un traitement
thermique spécifique
(cfr chapitre 6)

Renforcement des propriétés de l'aluminium.

$$R_e = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} + \sum_i a_i [A_i \text{‰}] + \alpha G b \sqrt{\rho} + \sum_j \frac{c_j G b (f_j)^{1/3}}{d_j}$$

- Les alliages d'aluminium
 - 2xxx : + Cu (duralumins) → Précipitation
 - 3xxx : + Mn → Ecrouissage
 - 5xxx : + Mg → Solution solide, écrouissage
 - 6xxx : + Mg/Si → Précipitation
 - 7xxx : + Zn → Précipitation

Propriétés mécaniques des alliages d'aluminium

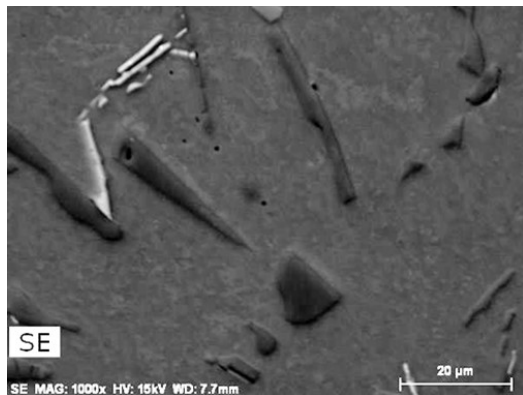
	Limite élastique (MPa)	Résistance en traction (MPa)	Allongement (%)
Al (pur)	10	50	60
Al (+ solutés)	35	90	35
Duralumins	250	400	15

Durcissement de précipitation

Renforcement des propriétés de l'aluminium.

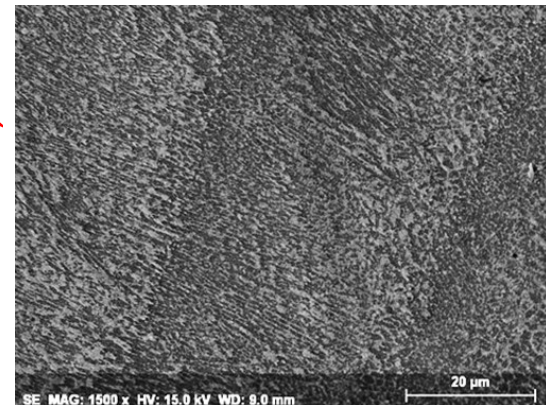
$$R_e = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} + \sum_i a_i [A_i \text{‰}] + \alpha G b \sqrt{\rho} + \sum_j \frac{c_j G b (f_j)^{1/3}}{d_j}$$

- Durcissement par affinage des grains (alliages eutectiques Al-Si).



Coulée conventionnelle

Vitesse de
solidification ↑↑
→



Fabrication additive (fusion laser sélective)

⇒ **Dureté très élevée!**