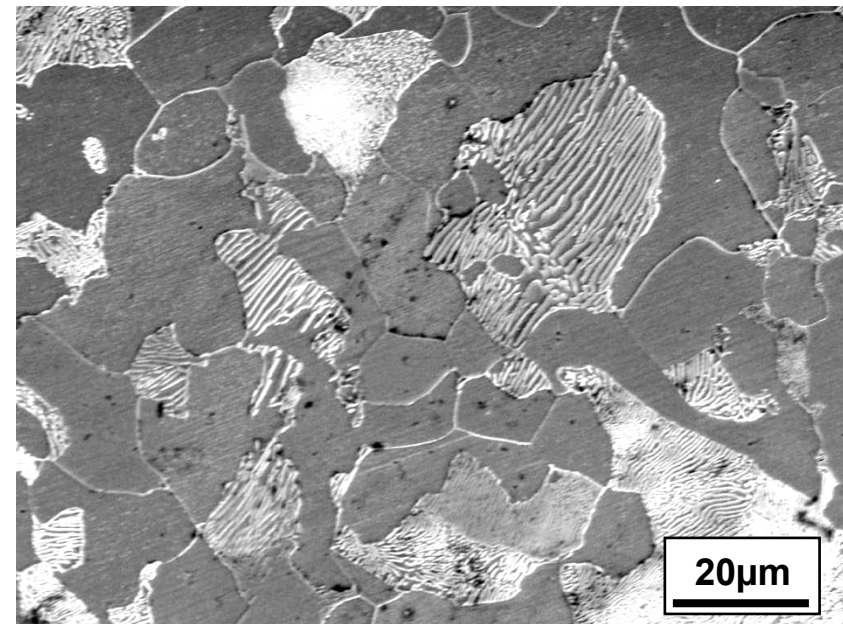


6- Les alliages ferreux

- a) Le fer pur
- b) Les aciers et les fontes
- c) Etude des aciers non alliés
- d) Aciers alliés
- e) Désignation
- f) Les fontes

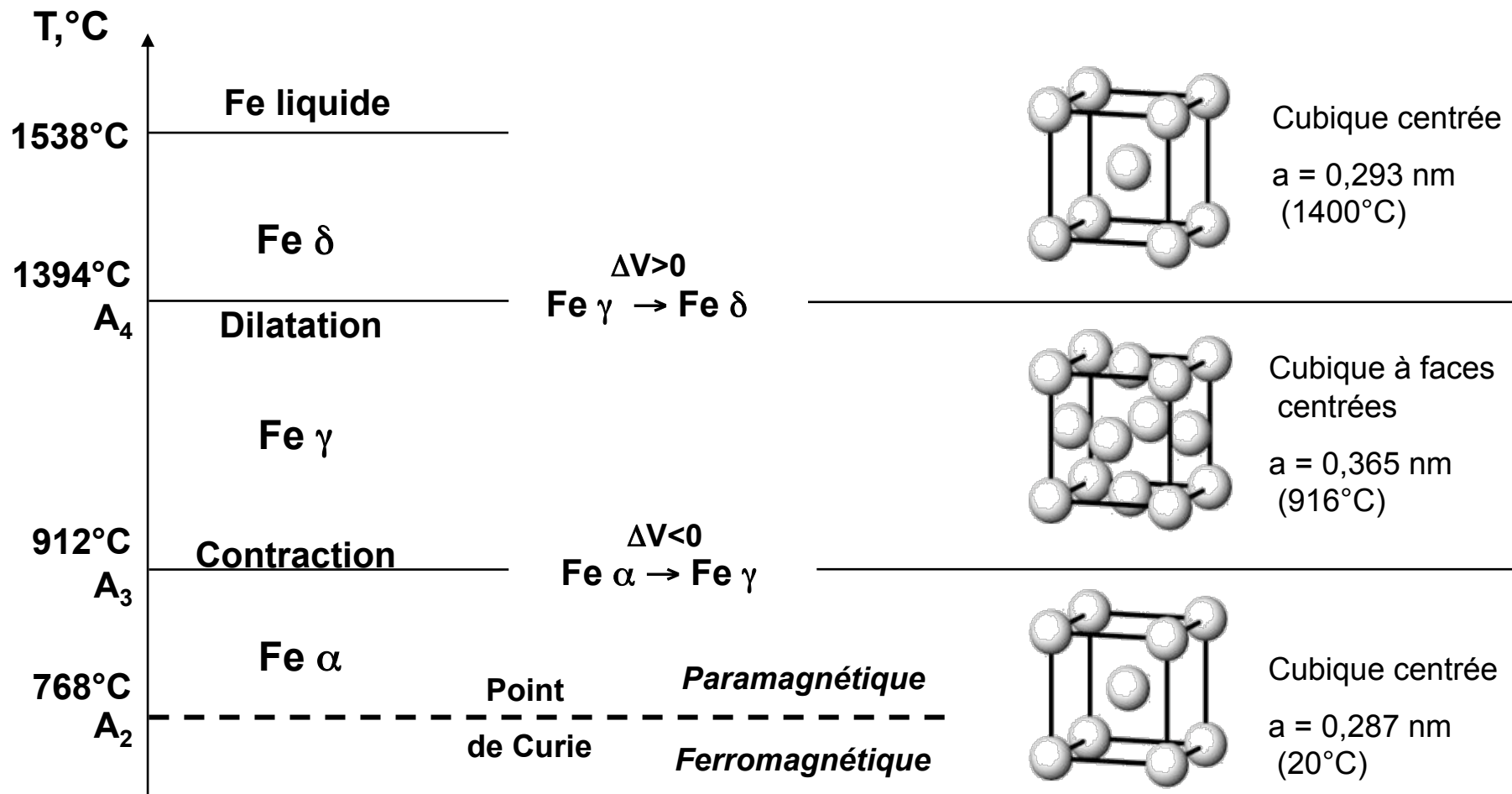
Acier hypoeutectoïde - image MEB



Source : J.E. Masse, Arts et Métiers ParisTech

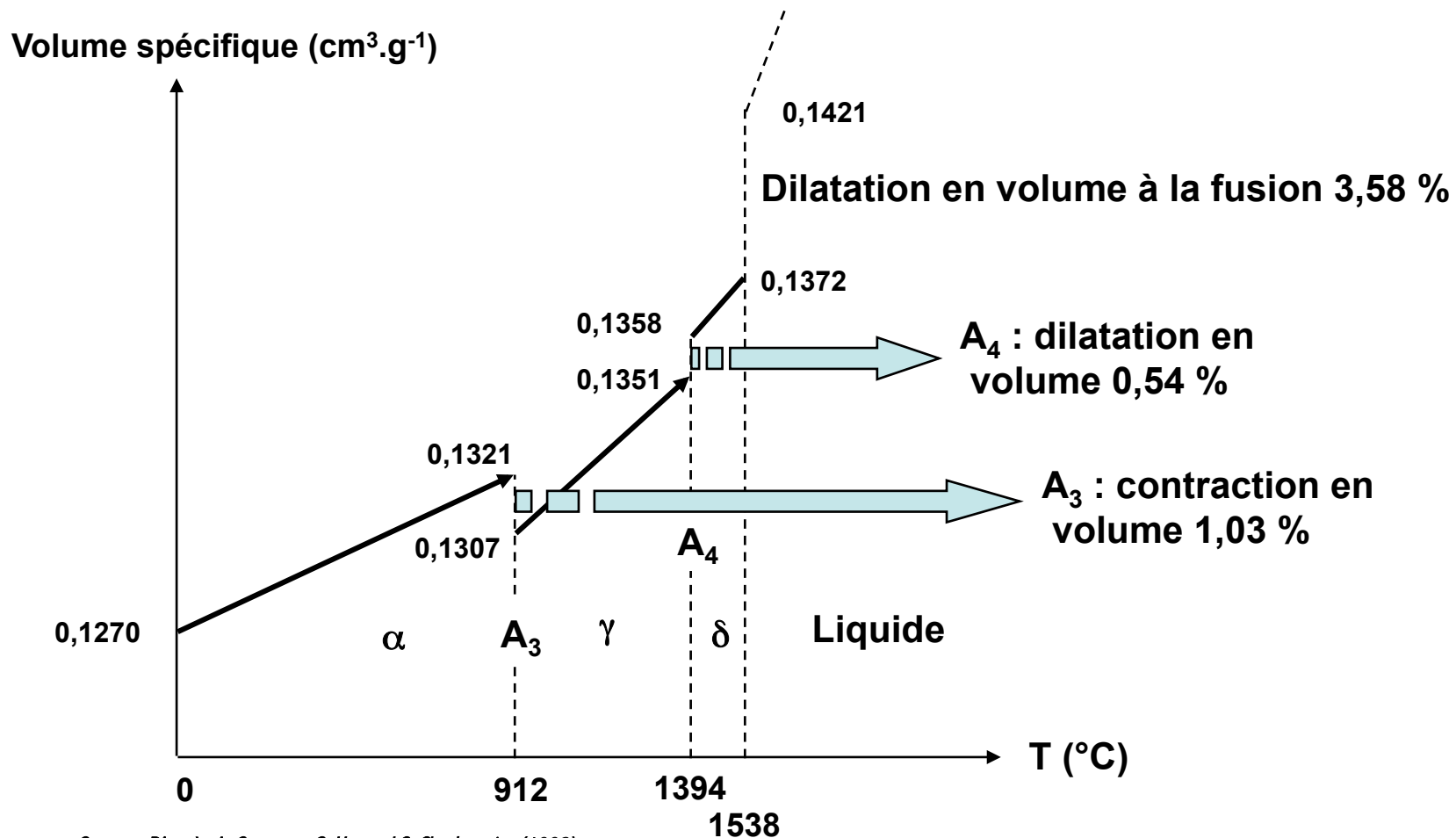
6-a Le fer pur

⇒ Transformations allotropiques et structures cristallines



6-a Le fer pur

⇒ Transformations allotropiques et volume spécifique

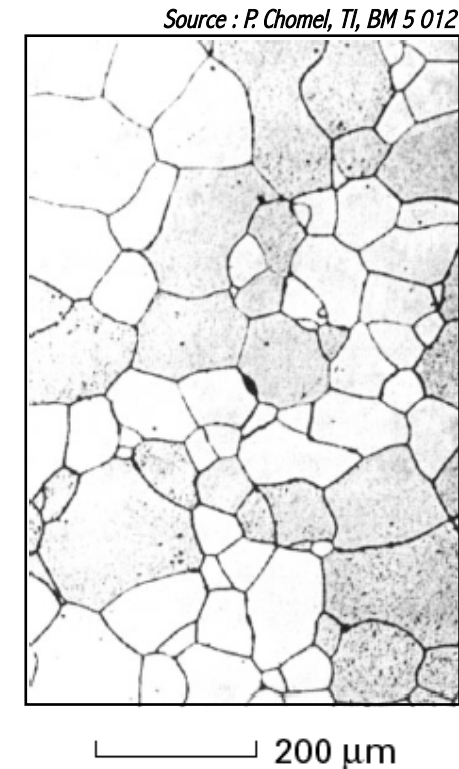


Source : D'après A. Constant, G. Henry, J.C. Charbonnier (1992)

6-a Le fer pur

⇒ Propriétés

- A température ambiante : structure cubique centrée
- Masse volumique : $7,870 \text{ g/cm}^3$
- Propriétés mécaniques (à 20°C) :
 - Module de Young : 210 GPa
 - Limite d'élasticité : 100 - 170 MPa
 - Résistance à la traction : 180 - 290 MPa
 - Allongement : 40 - 50%
 - Coefficient de striction : 80-95%
- Peu d'utilisations industrielles
- Modification des propriétés mécaniques par addition d'éléments d'alliages et/ou traitements thermomécaniques



*Fer pur : polycristal monophasé
Micrographie optique*

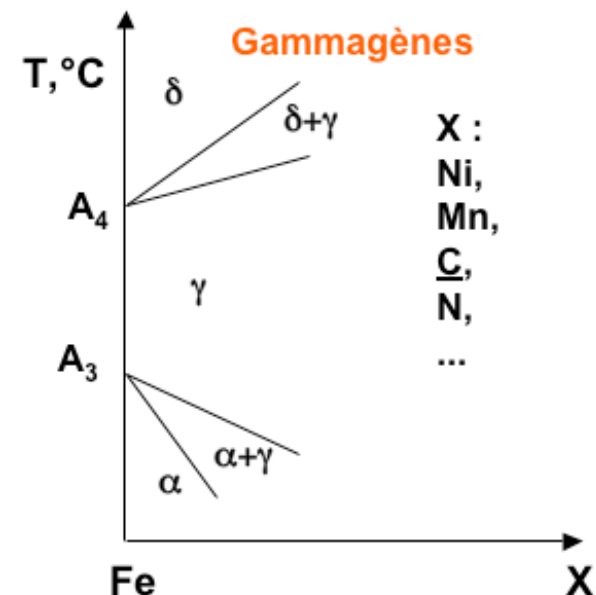
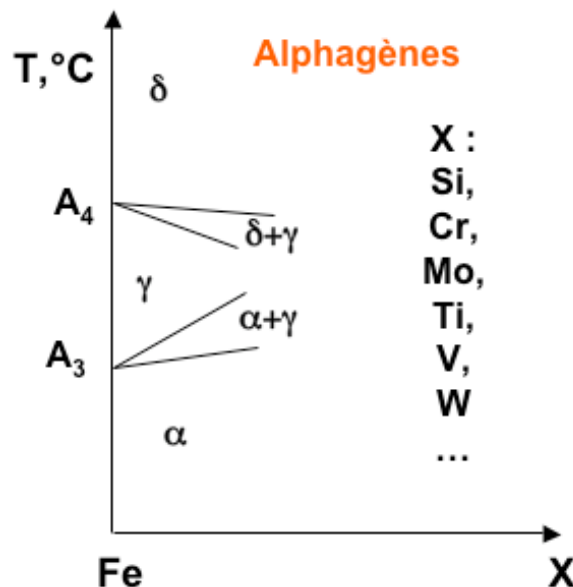
6-b Les aciers et les fontes

- Production mondiale en 2005 (source : Les Echos, 2007) :
 - Acier : 1 100 millions de tonnes Fonte : 711 millions de tonnes
 - Aluminium : 2,9 millions de tonnes Magnesium : 0,7 million de tonnes
- Acier : $C \leq 2\%$ massique - Fonte $C > 2\%$ massique
- Aciers non alliés : teneur des éléments (autre que C) inférieures à des limites fixées par la norme NF EN 10027. Exemple : C35
- Aciers faiblement alliés : aucun des éléments d'alliages n'a une teneur supérieure à 5%. Exemple : 36NiCrMo16
- Aciers fortement alliés : un des éléments d'alliages au moins a une teneur supérieure à 5%. Exemple : X5CrNi18-10
- Fontes : distinction selon la forme sous laquelle se trouve le carbone (cémentite ou graphite) et leur composition chimique. Fontes à graphite ou fontes grises (lamellaire, nodulaire, sphéroïdal, vermiculaire), fontes blanches (non alliées, alliées)

6-b Les aciers et les fontes

⇒ Éléments α -gènes et γ -gènes

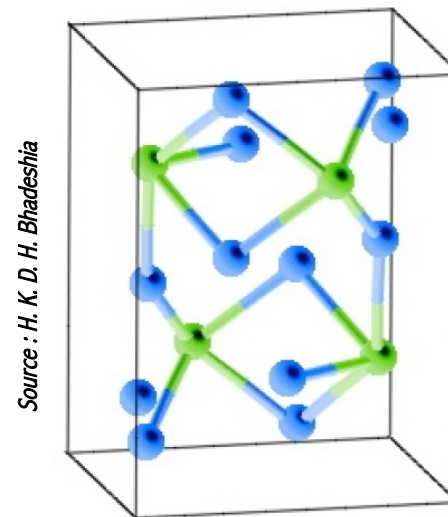
- Fe : alliages avec de nombreux éléments. Modification des points A_3 et A_4 par mise en solution solide des éléments d'alliage.
- Element alphagène : tout élément qui stabilise la phase cubique centrée. Elève la température du point A_3 et abaisse la température du point A_4 .
- Element gammagène : tout élément qui stabilise la phase cubique à faces centrées. Abaisse la température du point A_3 et élève la température du point A_4 .



6-b Les aciers et les fontes

⇒ Le système binaire fer-carbone : les phases

- Ferrite α : **solution solide d'insertion de carbone dans $Fe\alpha$** (solubilité max. 0,02% en masse à 727°C). Cubique centrée. Ductile et peu dure.
- Ferrite δ : **solution solide d'insertion de carbone dans $Fe\delta$** (solubilité max. 0,1% en masse à 1487°C). Cubique centrée.
- Austénite γ (*W.C. Roberts-Austen 1843-1902*) : **solution solide d'insertion de carbone dans $Fe\gamma$** . Cubique à faces centrées. Ductile. Stable uniquement au-dessus de A_1 pour les aciers non alliés.
- Cémentite ou carbure de fer Fe_3C (carbone : 6,67% en masse). Composé interstitiel à maille orthorhombique. Très grande dureté (700 - 800 Hv) mais très fragile.
- Carbone pur (graphite) C_{gr} : forme stable de la phase riche en carbone du système fer-carbone.

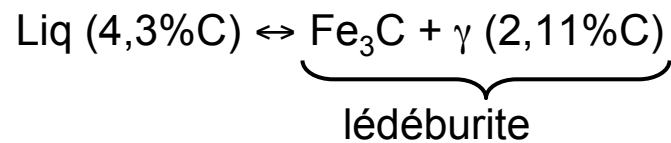


Représentation de la cémentite

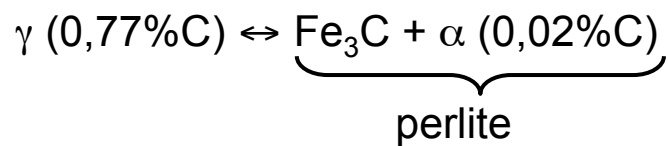
6-b Les aciers et les fontes

⇒ Le diagramme Fe-Fe₃C : diagramme métastable

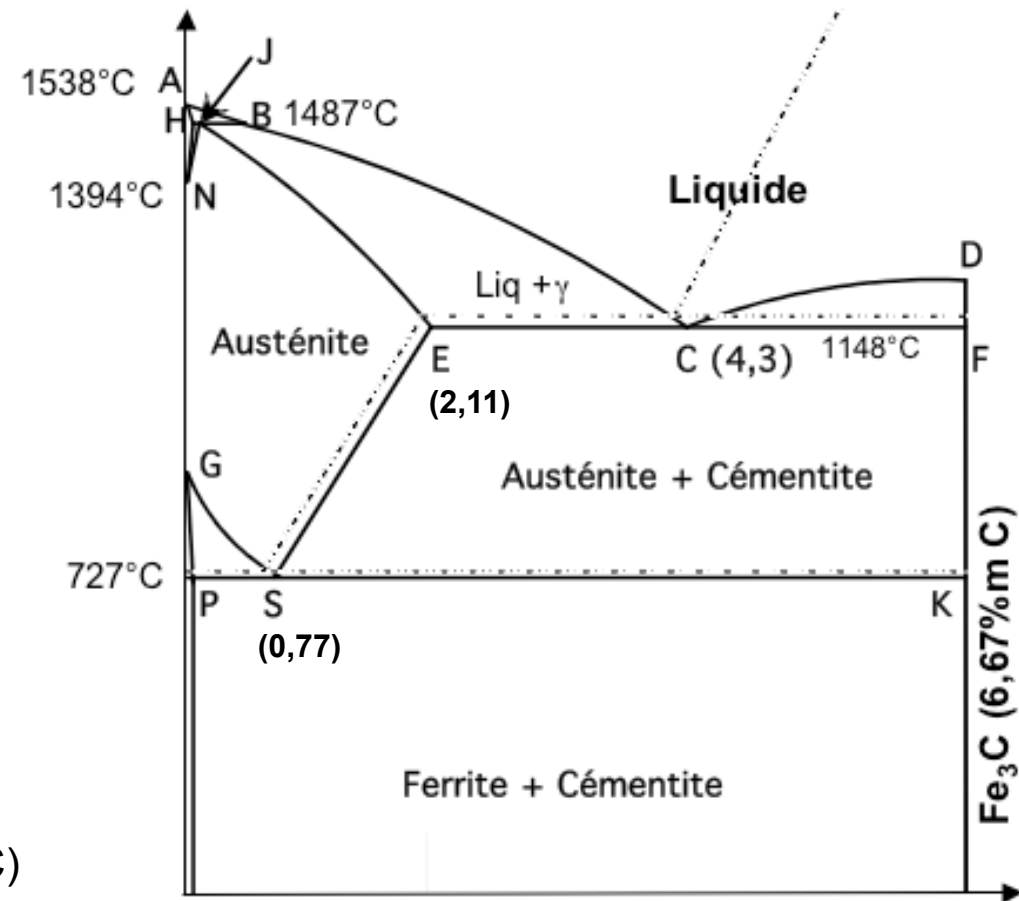
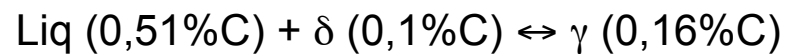
- Transformation eutectique, 1148°C



- Transformation eutectoïde, 727°C



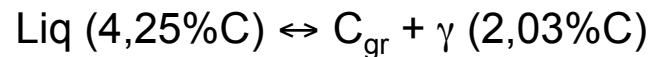
- Transformation peritectique, 1487°C



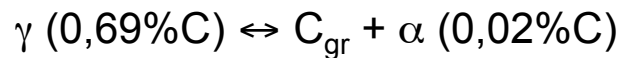
6-b Les aciers et les fontes

⇒ Le diagramme Fe-C : diagramme stable

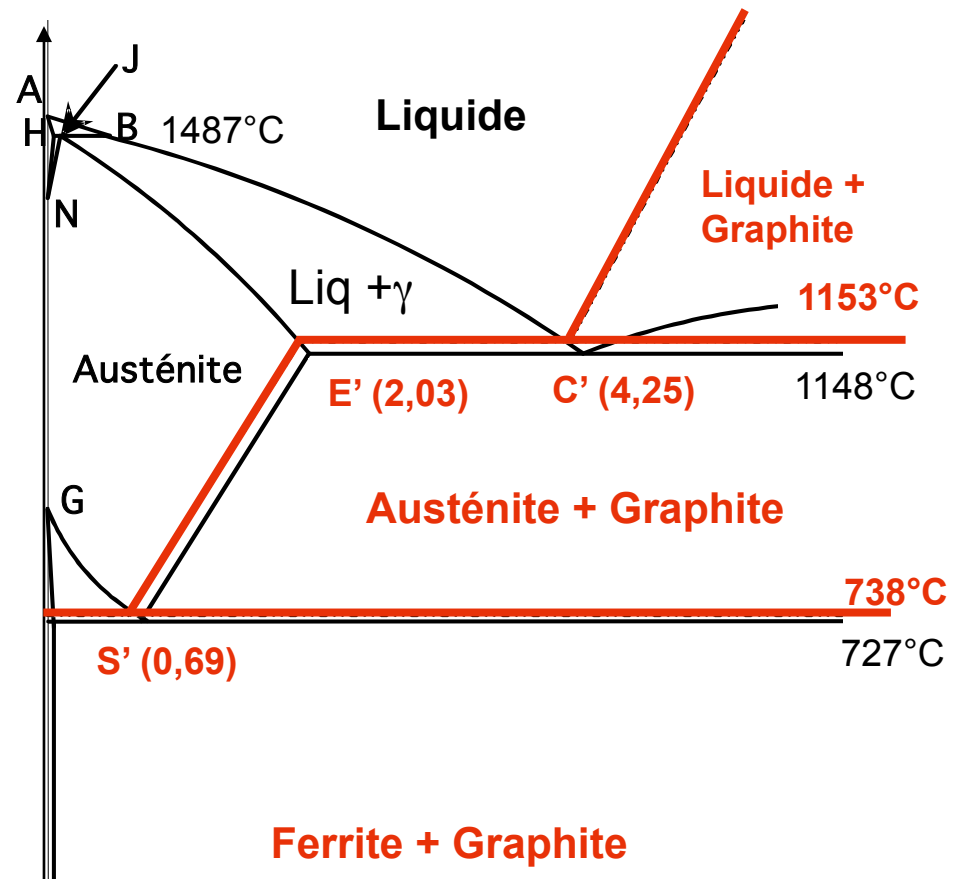
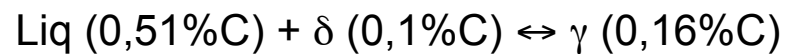
- Transformation eutectique, 1153°C



- Transformation eutectoïde, 738°C



- Transformation peritectique, 1487°C



6-c Etude des aciers non alliés

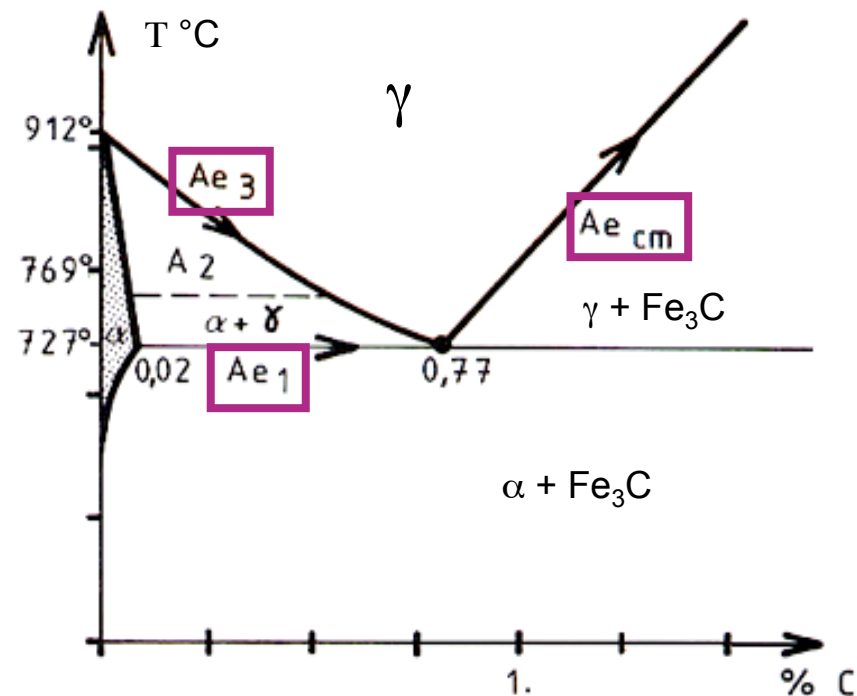
- Alliages de teneur en C < 2% (*limite pratique 1,4-1,5 %C*)
- Présence d'éléments d'élaboration (Mn, Si, S, P, Cu, Al, N, O...) - Limites fixées (norme NF EN 10020). Eléments en solution solide (P, Si, Mn) ou en combinaison dans inclusions (MnS, FeS, SiO₂...). Influencent le comportement mécanique.
- Constitutions à l'état recuit (quasi-équilibre) :

| Teneur en carbone | Constitution |
|--|-----------------------------------|
| $0 < \%C < 0,02$ | Ferrite (+ <i>cémentite</i>) |
| $0,02 < \%C < 0,77$ [hypoeutectoïdes] | Ferrite proeutectoïde + perlite |
| $\%C = 0,77$ (eutectoïde) | Perlite |
| $0,77 < \%C < 2$ [hypereutectoïdes] | Cémentite proeutectoïde + perlite |

6-c Etude des aciers non alliés

⇒ Points de transformation

- Températures d'équilibre :
 - Ae_1 : limite inférieure d'existence de l'austénite. Transformation eutectoïde
 - Ae_3 : limite supérieure d'existence de la ferrite
 - Ae_{cm} : limite supérieure d'existence de la cémentite (acier hypereutectoïde)
- Transformations au chauffage et au refroidissement : températures différentes (hystérésis)
- Trois positions : $A_c - A_e - A_r$



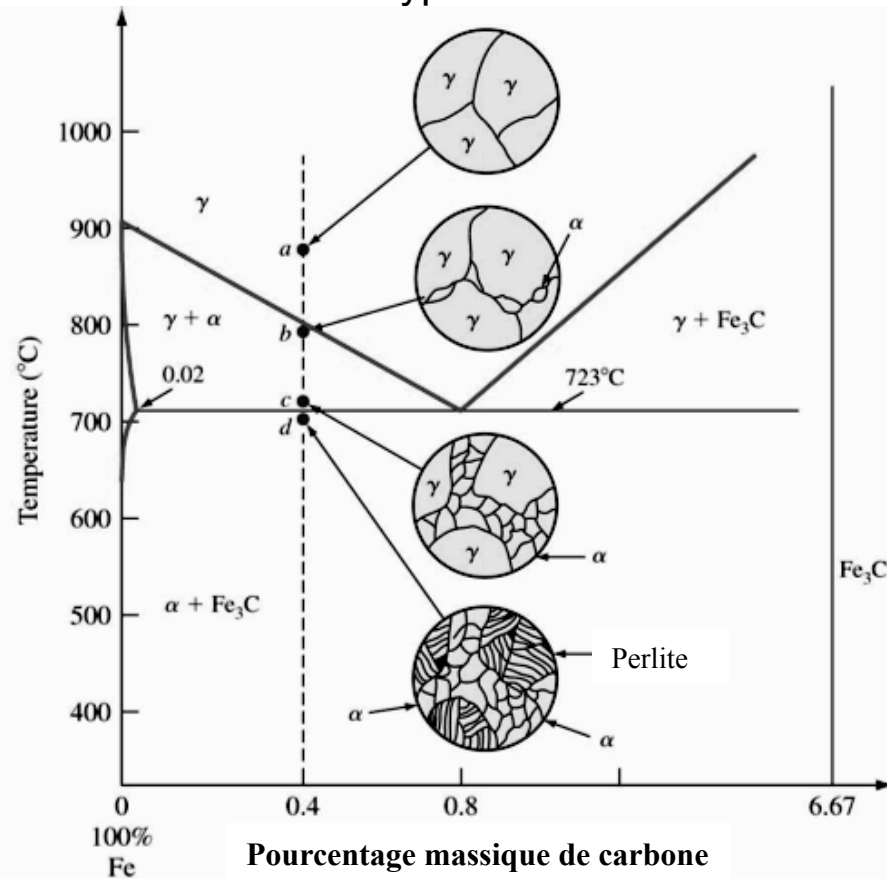
Source : J. Barralis, G. Maeder, Précis de Métallurgie (1995)

Points de transformation principaux des aciers

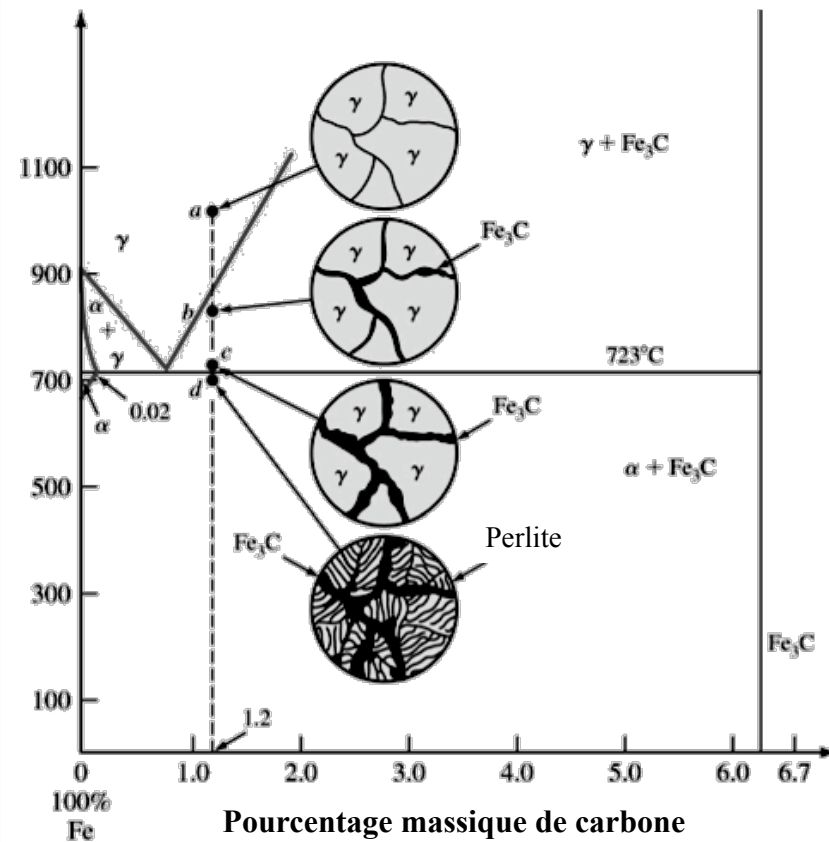
6-c Etude des aciers non alliés

⇒ Diagramme fer-carbone des aciers non alliés. Microstructures d'équilibre

Acier hypoeutectoïde



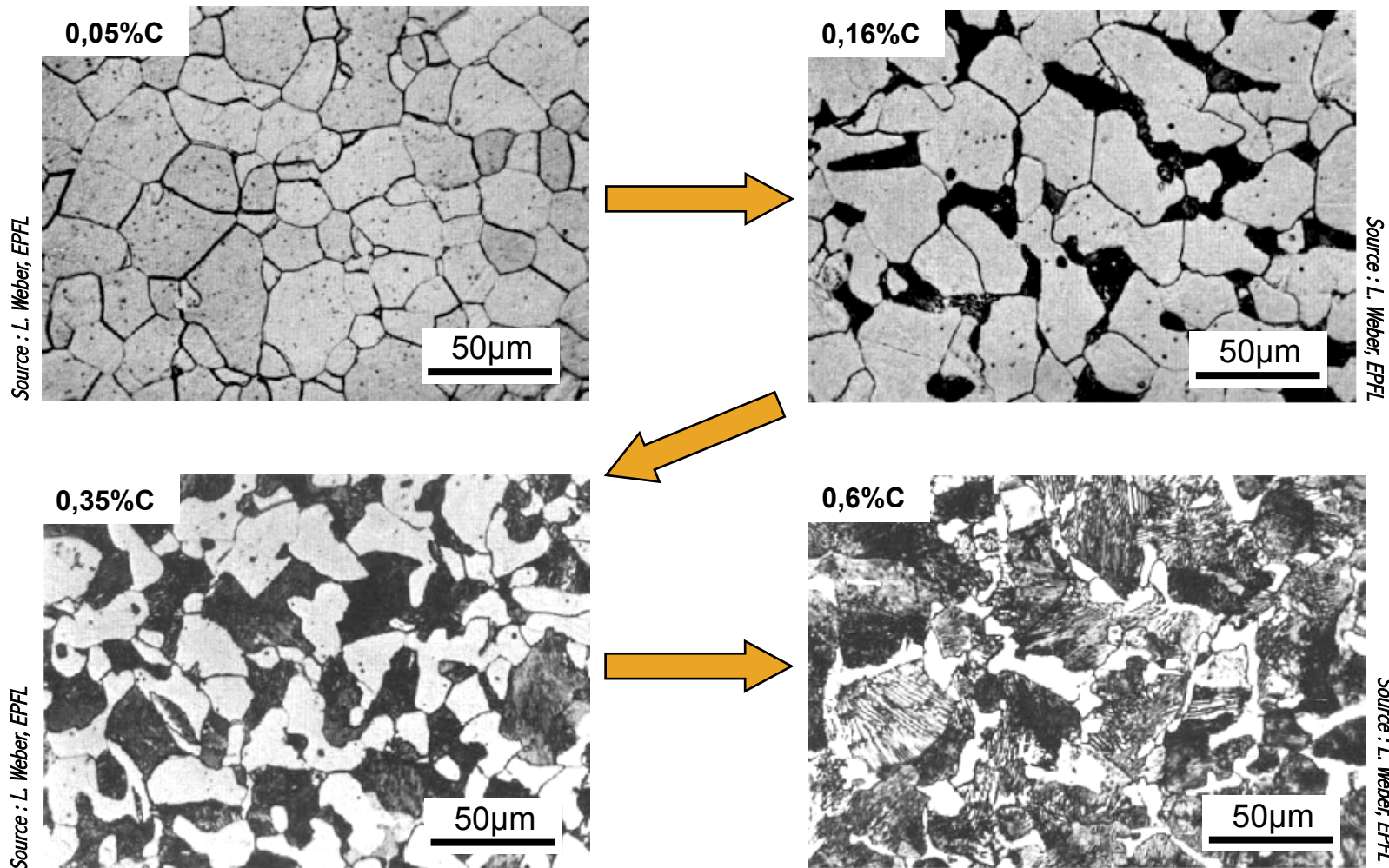
Acier hypereutectoïde



Source : D'après Callister, Science et génie des matériaux (2003)

6-c Etude des aciers non alliés

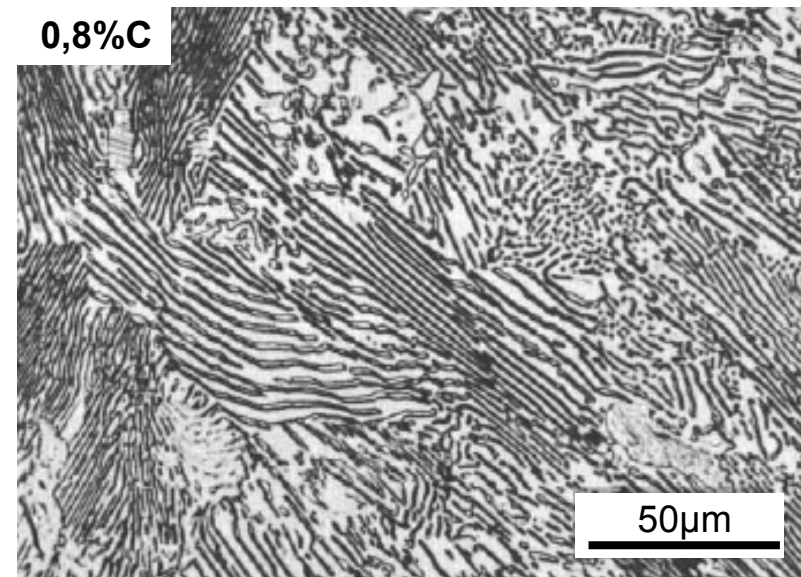
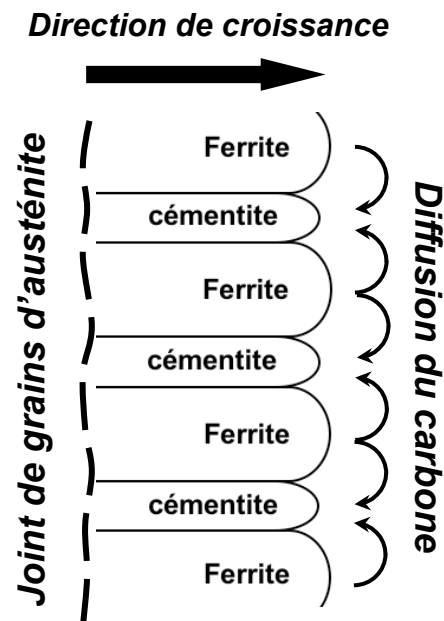
⇒ Microstructure : aciers hypoeutectoides



6-c Etude des aciers non alliés

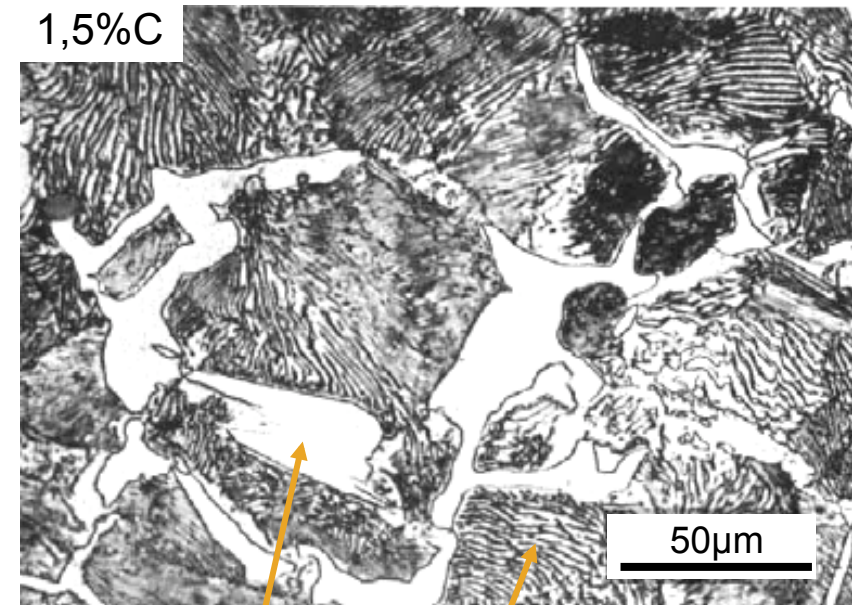
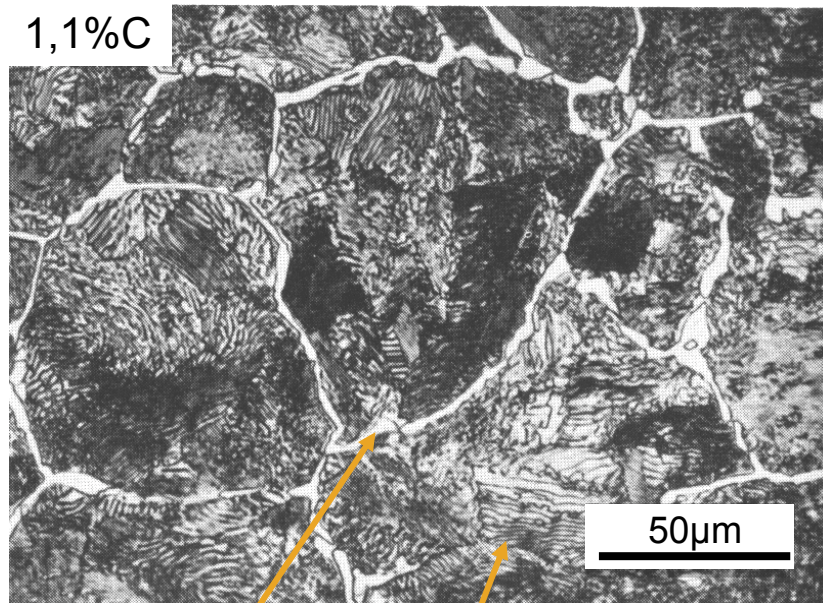
⇒ Microstructure : aciers eutectoïdes

- Perlite : mélange eutectoïde d'environ 88% de ferrite (α) et 12% de cémentite (Fe_3C) sous forme de lamelles alternées.
- Phase nucléante Fe_3C . Germination à partir des joints de grain de l'austénite (γ). Croissance par diffusion du carbone.
- Paramètre essentiel : espacement interlamellaire.
- $R_e \approx 800 \text{ MPa}$, $HV \approx 200$, $A\% \approx 10$.



6-c Etude des aciers non alliés

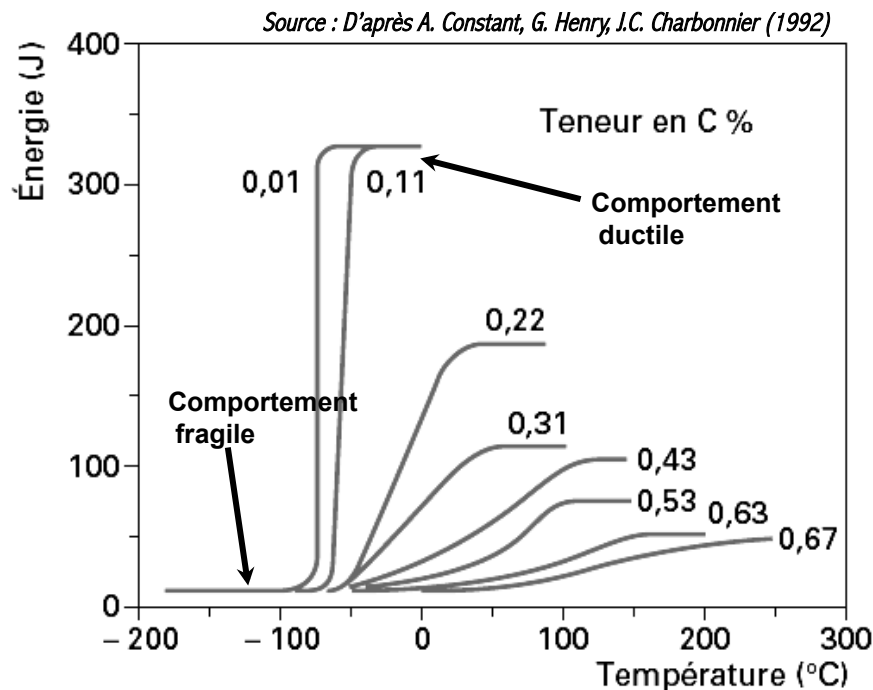
⇒ **Microstructure : aciers hypereutectoïdes**



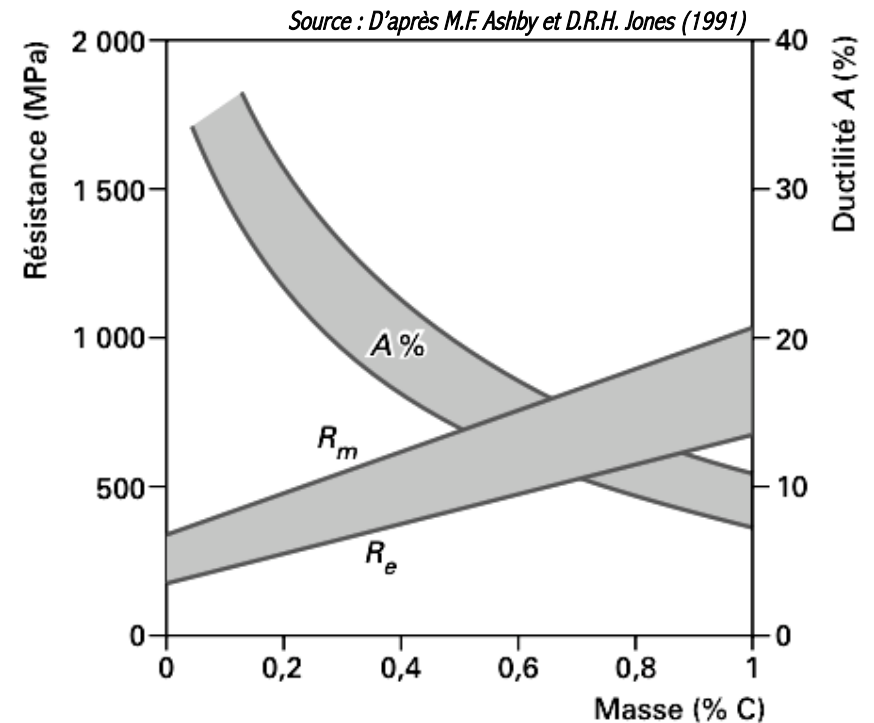
6-c Etude des aciers non alliés

⇒ Relations microstructure-propriétés mécaniques : aciers ferrito-perlitiques

Influence de la teneur en carbone



Effet de la teneur en carbone sur l'énergie de rupture par choc des aciers au carbone de structure ferrito-perlitique



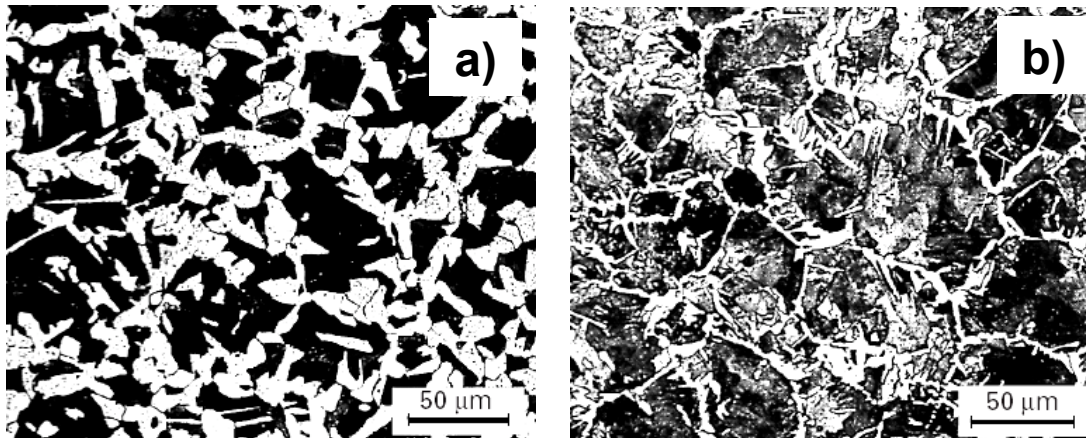
Propriétés mécaniques des aciers au carbone normalisés (traction uniaxiale)

6-c Etude des aciers non alliés

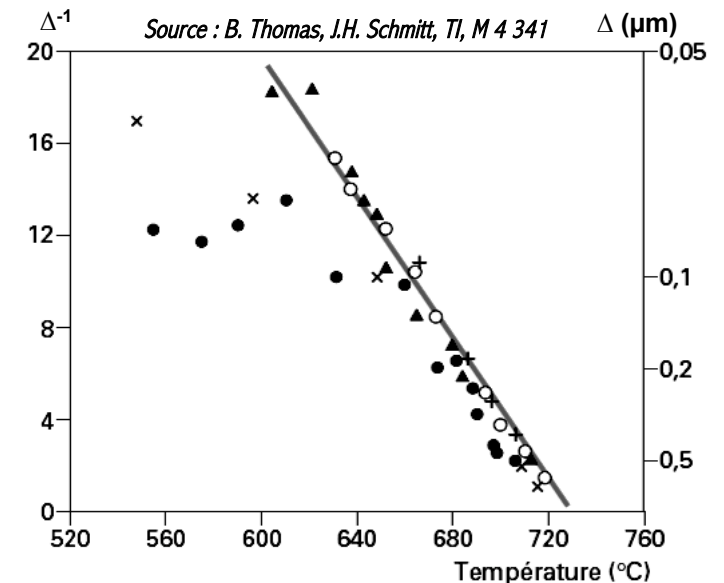
⇒ Relations microstructure-propriétés mécaniques : aciers ferrito-perlitiques

Influence de la vitesse de refroidissement (1/2)

Source : D'après P.G. Shewmon, "Transformations in Metals", McGraw-Hill, 1969



Affinement grains ferritiques :
 $V_R = 2^\circ\text{C/s}$, polygonaux équiaxes (a)
 $V_R = 20^\circ\text{C/s}$, aciculaires (b)



● × ▲ ○ résultats obtenus par différents chercheurs

Variation de l'espacement
interlamellaire Δ de la perlite en
fonction de la température de
transformation

6-c Etude des aciers non alliés

⇒ **Relations microstructure-propriétés mécaniques : aciers ferrito-perlitiques**

Influence de la vitesse de refroidissement (2/2)

| | Limite d'élasticité (R_e) | Température de transition fragile / ductile |
|--|-------------------------------|---|
| Grosseur moyenne du grain ferritique ↘ | ↗ | ↘ |
| Espacement interlamellaire dans la perlite ↘ | ↗ | ↗ |

Contrôle de la vitesse de refroidissement

⇒ **Moyen de contrôler la microstructure**

⇒ **Modulation des propriétés mécaniques**

6-d Aciers alliés

- Nécessité d'amélioration de certaines propriétés
- Alliages au moins ternaires (Fe-C-X)
- Principaux éléments d'alliages : Al, Co, Cr, Cu, Mo, Nb, Ni, Pb, Ti, V, W (+ Si, Mn, S, P : éléments normaux d'élaboration) - Norme NF EN 10020 « Définition et classification des nuances d'acier »

- Modification des transformations eutectiques et eutectoïdes (t, T, x%)
- Modification des domaines d'existence des solutions solides α , δ (CC) et γ (CFC) :
 - effet alphagène : Si, Cr, Mo, V, W, Ti, Nb, S...
 - effet gammagène : Ni, Mn, C, N ...
- Modification de la nature des carbures formés
 - Cémentites alliées : $(\text{Fe}, \text{X})_3\text{C}$
 - Carbures spéciaux : M_{23}C_6 , M_6C , M_2C , M_7C_3 , MC
 - éléments carburigènes : Mn, Cr, Mo, W, V, Ti, Nb
 - éléments non carburigènes : Si, Al, Cu, Ni, Co

Influence des
éléments d'alliage
sur les propriétés

6-e Désignation

⇒ Désignation selon NF EN 10027-1

Désignation selon l'emploi et les caractéristiques mécaniques ou physiques

Lettre précise le domaine d'application :

S = acier de construction

P = acier pour appareil à pression

L = acier pour tubes

E = acier de construction mécanique...

Une valeur numérique indique la limite d'élasticité ou une propriété physique garantie

Eventuellement symboles pour d'autres propriétés ou conditions de fabrication

S355 : acier de construction, $Re \geq 355$ MPa, état normalisé

Désignation selon la composition chimique

Acier non allié

CXX : lettre C suivi de la teneur en C x 100

C48 : acier avec une teneur en C de 0,48%

Acier faiblement allié

Aucun des éléments ne dépasse 5%

C : 100 fois

Cr, Co, Mn, Ni, Si, W... : 4 fois

pour les autres : 10 fois

Teneur décroissante

42 Cr Mo 4 : 0,42%C, 1%Cr, Mo

10 Cr Mo 9-10 : 0,10%C, 2,25%Cr, 1%Mo

Acier fortement allié

Au moins un élément dépasse 5%

Lettre X

C : 100 fois

Teneur décroissante

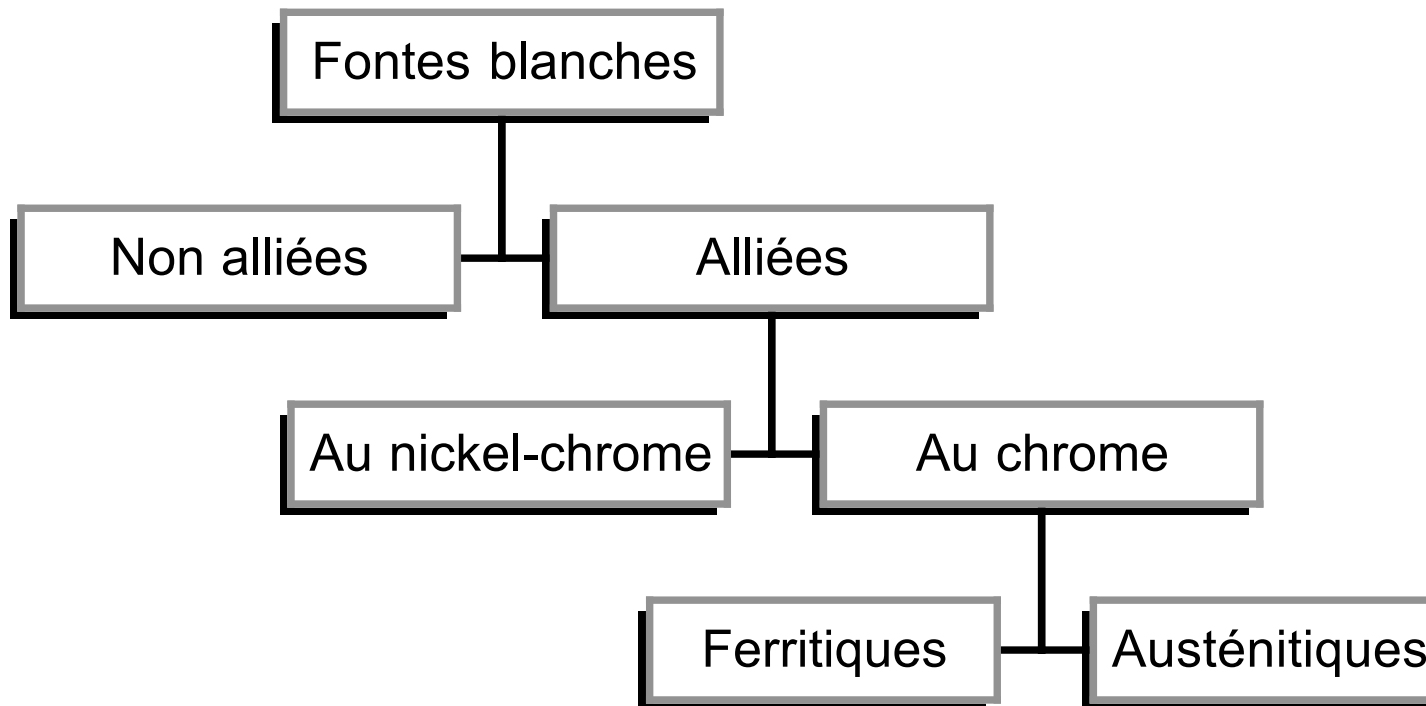
Pas de coefficient pour les autres éléments

X 9 Cr Ni 18.9 : 0,09%C, 18%Cr, 9%Ni

6-f Les fontes

⇒ Fontes blanches (fontes à cémentites)

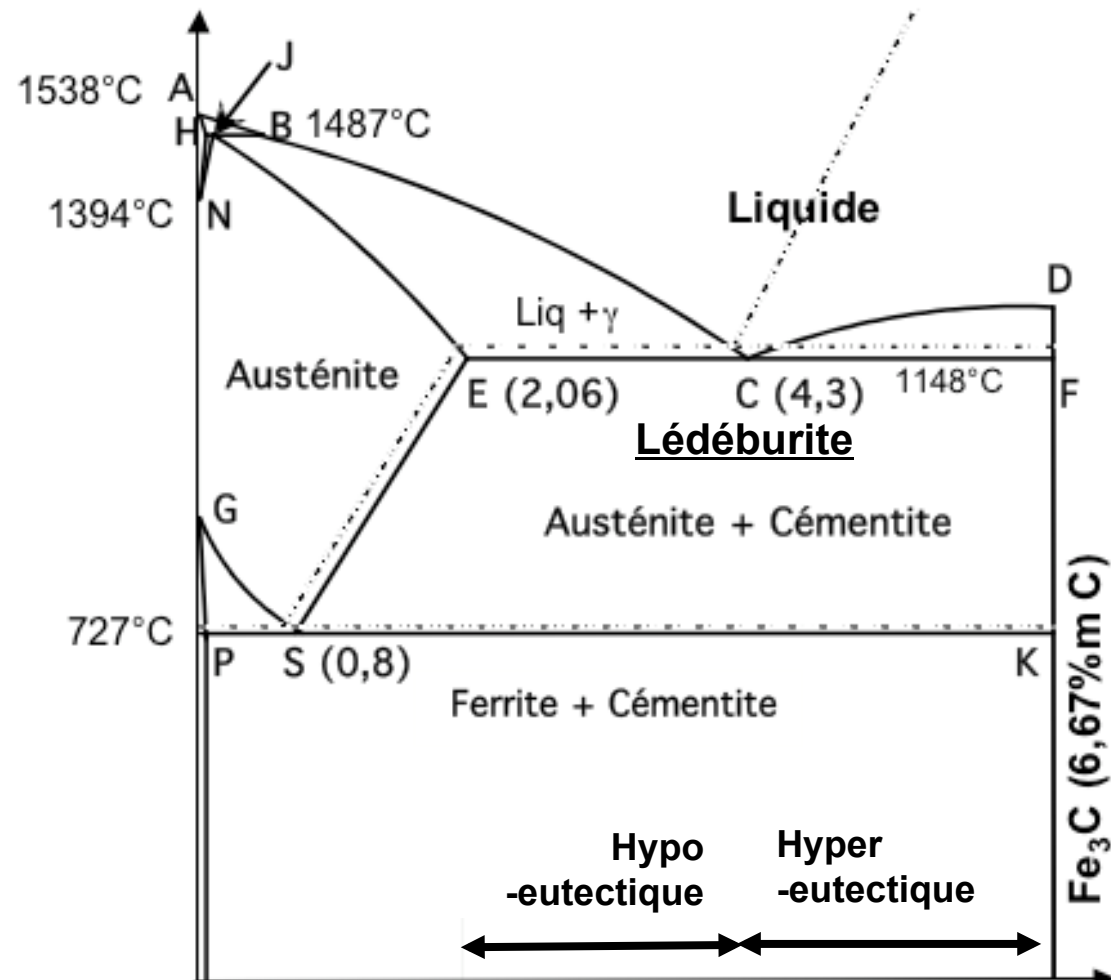
Diagramme métastable. Le carbone se présente à l'état combiné (carbures) ou dissous. Compositions hypoeutectique, eutectique ou hypereutectique.



6-f Les fontes

⇒ Fontes blanches (fontes à cémentites) non alliées

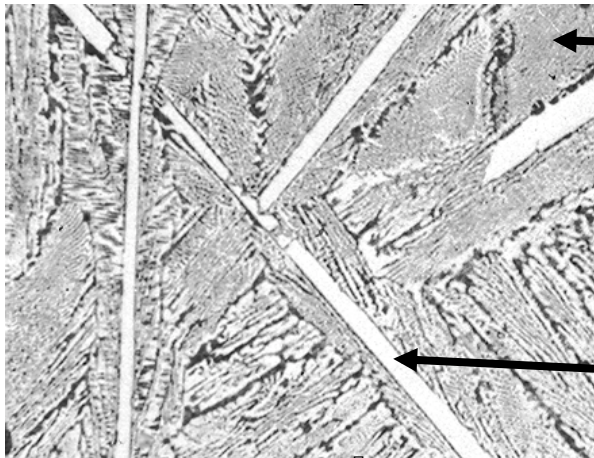
- Refroidissement rapide
- Élément anti-graphitisant (Mn)
- Stabilisateurs de cémentite
- Matrice quasi-continue de carbures de fer, blocs et îlots eutectoïdes
- Agrégat eutectique : lédéburite : îlots d'austénite à 2% C dans matrice cémentite
- Non déformables à froid (carbures de fer)
- Grande résistance à l'usure et à l'abrasion (boulets de broyeurs, mâchoires de concasseurs, plaques d'usure...), bonne coulabilité, bel aspect (objets d'art)
- Difficilement usinable



6-f Les fontes

⇒ Fontes blanches (fontes à cémentites) non alliées : microstructures

Source : F. Condet, A. Raynaud, Atlas métallographique des fontes, 2007



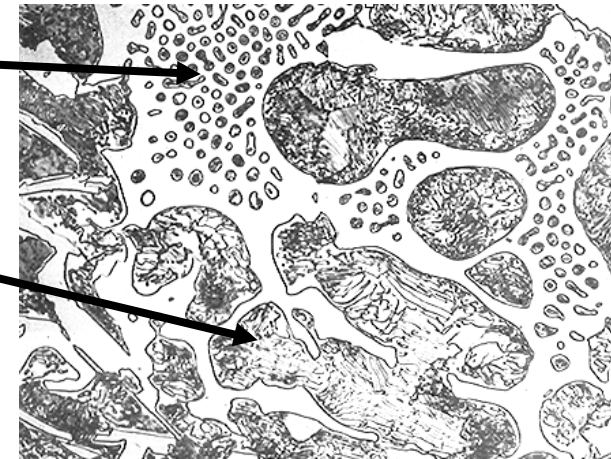
Fonte blanche hypereutectique

Cémentite et perlite (morphologie lédéburitique)

Perlite (dendrite hypoeutectique)

Cémentite primaire

Source : F. Condet, A. Raynaud, Atlas métallographique des fontes, 2007

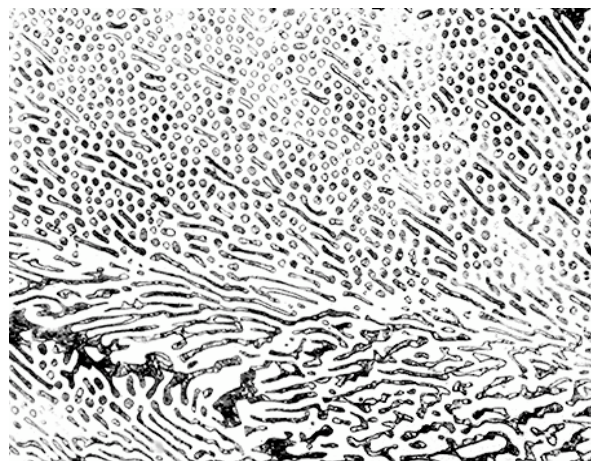


Fonte blanche hypoeutectique

Cémentite et perlite

Fonte blanche eutectique

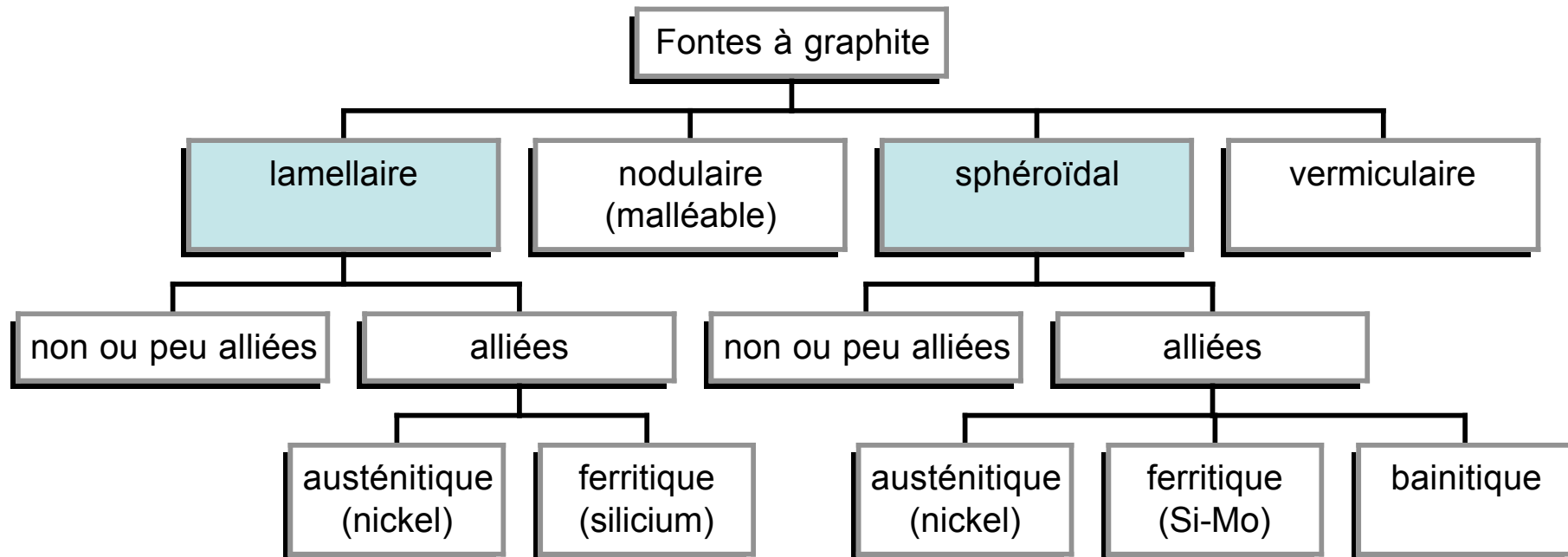
Source : F. Condet, A. Raynaud, Atlas métallographique des fontes, 2007



6-f Les fontes

⇒ Fontes grises (fontes à graphite)

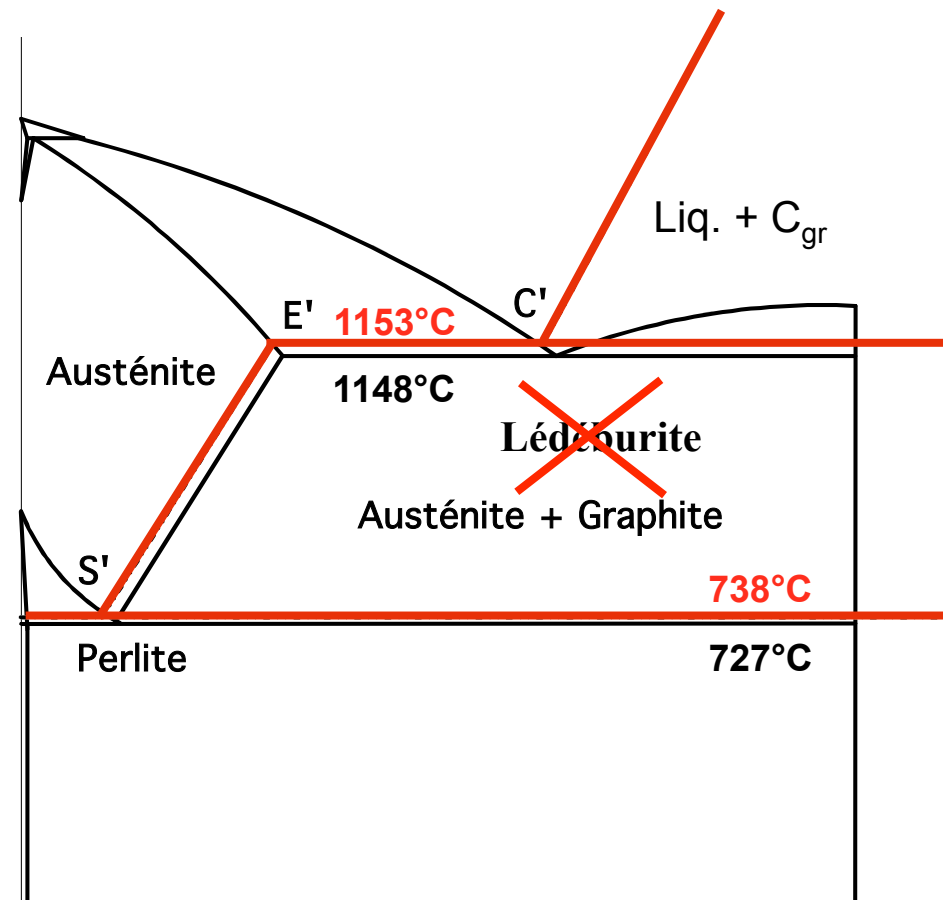
Solidification suivant diagramme stable. Possible transition sur diagramme métastable suivant %C dans l'austénite (condition de refroidissement). Non alliées : 3-4% C, Si<3%, Mn<1,2%, P<1,2%.



6-f Les fontes

⇒ Fontes grises (fontes à graphite) non alliées

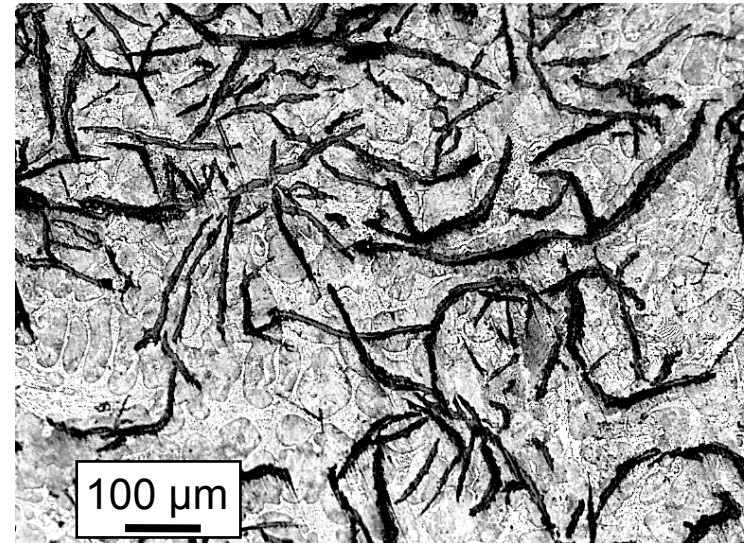
- Température de coulée élevée.
- Refroidissement lent.
- Élément graphitisant (Si).
- Pas de stabilisateurs de cémentite.
- Solidification suivant le diagramme stable.
- Transition stable / instable (teneur en C de l'austénite).
- Graphite sous différentes formes : lamellaire, sphéroïdal, nodulaire, vermiculaire.
 - Les formes compactes du graphite (particules sphériques, nodules), permettent d'avoir des propriétés de ténacité proches de celles des aciers (effet d'entaille minimal).



6-f Les fontes

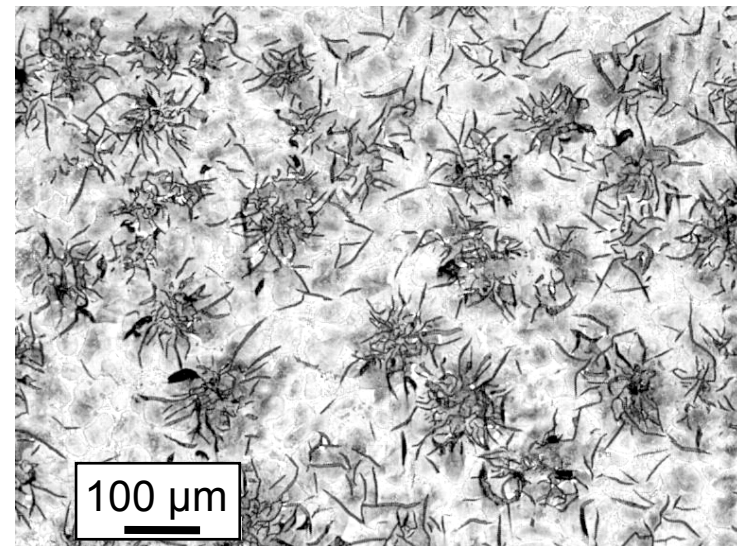
⇒ **Fontes grises : fontes à graphite lamellaire**

- Structure : graphite en lamelles (forme et répartition suivant NF EN ISO 945).
- Principales qualités :
 - Facilité d'usinage
 - Très bonne résistance à la corrosion
 - Stabilité dimensionnelle
 - Excellente coulabilité
 - Prix
- Fragile (graphite : diminution section efficace, effet d'entaille).
- R_m : 150 à 400 MPa, A% : 0,5 à 1
- Utilisation : contrepoids, éléments de chauffage, plaques et inserts de cheminée, conduites et tuyaux (à l'exclusion des conduites de gaz), bâtis de machines outil...



Source : J.E. Masse, Arts et Métiers ParisTech

Lamelles sans orientation préférentielle



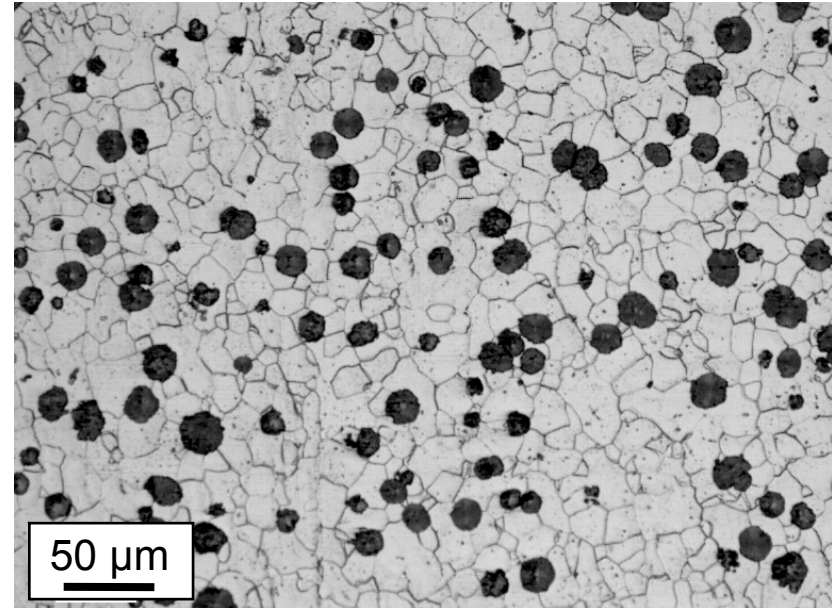
Source : J.E. Masse, Arts et Métiers ParisTech

Graphite en rosettes

6-f Les fontes

⇒ Fontes grises : fontes à graphite sphéroïdal

- Structure : graphite sous forme de sphéroïdes (forme et répartition suivant NF EN ISO 945).
- Par : addition d'éléments spécifiques au métal liquide (Mg) et inoculation au ferrosilicium (évite la structure blanche)
- Principales qualités :
 - Résistance
 - Ductilité
 - Bonne coulabilité
 - Soudabilité
- Rm : 400 (FGS ferritique) à 800 MPa (FGS perlitique). A% 1-5 (FGS perlitique) à 15-20 (FGS ferritique)



Source : J.E. Massé, Arts et Métiers ParisTech

Fonte GS à matrice ferritique

- Utilisation : industrie automobile (blocs moteur, disques de freins, des tambours de freins, organes de suspension, arbre à came, vilebrequin...), éléments de voirie (grilles et regards d'assainissement), mobilier urbain...

6-f Les fontes

⇒ Désignation selon NF EN 1560

- Désignation symbolique constituée de 6 indications
 - 1) (Obligatoire) : lettres EN
 - 2) (Obligatoire) : lettres G (Gusswerkstoff, matière moulée en allemand) et J (fonte)
 - 3) (Optionnel) : lettre précisant la structure du graphite (L, S, M, V, Y, N : absence de graphite)
 - 4) (Optionnel) : lettre précisant la structure micrographique (A, F, P, M, L, Q, T, B, W)
 - 5) (Obligatoire) : classement suivant propriétés mécaniques (a) ou composition (b)
 - 6) (Optionnel) : exigences complémentaires (LT basse température, RT haute température)
 - a) Valeur minimale de R_m - Allongement minimal - valeur nominale de dureté (précédée de HB) + type d'échantillonnage (S, U, C)
 - b) Lettre X suivi des éléments d'alliage et de leur teneur en %
- *Exemple 1 : EN-GJS-400-18-S : fonte à graphite sphéroïdal avec $R_m > 400$ MPa, $A > 18\%$ sur éprouvette coulée séparément*
- *Exemple 2 : EN-GJN-X300Ni-Cr-4-2 : fonte blanche avec 3% carbone 4% nickel et 2% chrome*