

Traitements thermiques des métaux

- 1- Rappels et prérequis**
- 2- Transformations au chauffage**
- 3- Transformations de l'austénite**
- 4- Transformations au revenu**
- 5- Applications**

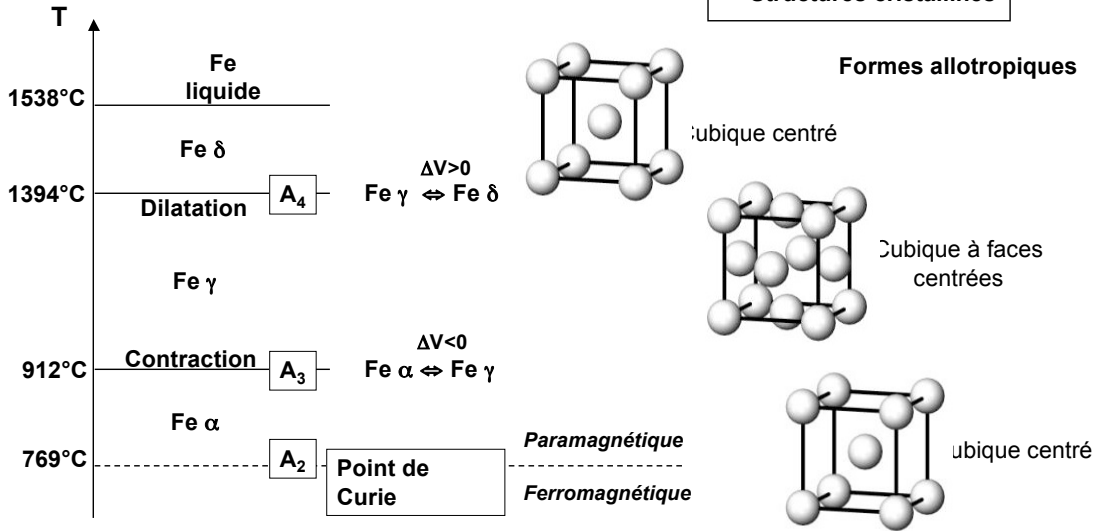
 **Rappels**

- 1-1. Le fer**
- 1-2. Le diagramme fer-cémentite**
- 1-3. Transformations à l'équilibre**
- 1-4. Structures hors équilibre**

1-1. Le fer 'pur'

⇒ Points de transformation

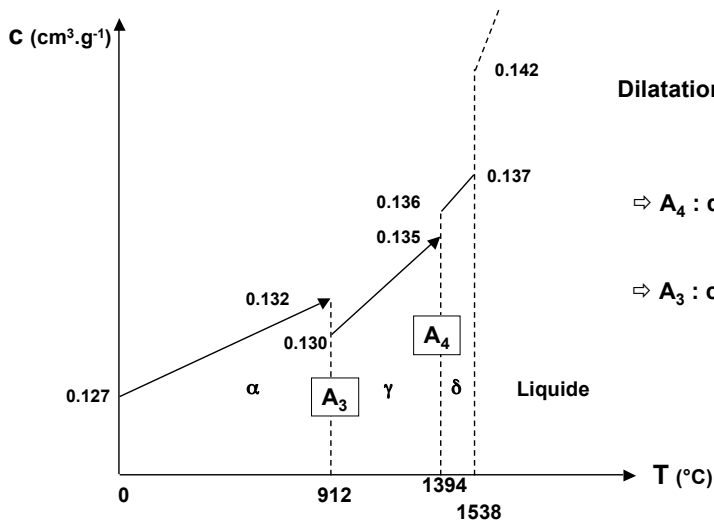
⇒ Structures cristallines



Traitements thermiques - Rappels

⇒ Volume spécifique

Volume augmente avec la température



Dilatation en volume à la fusion 3.58 %

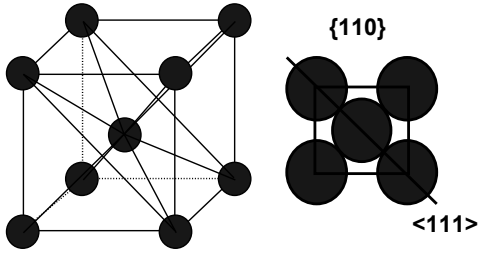
⇒ A₄ : dilatation en volume 0.54 %

⇒ A₃ : contraction en volume 1.03 %

Traitements thermiques - Rappels

⇒ Les réseaux cristallins du fer 'pur'

Cubique centré



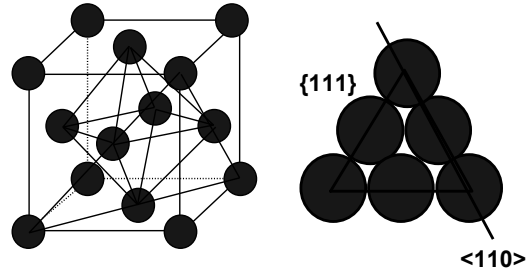
2 atomes par maille = $8 \cdot \frac{1}{8} + 1 \cdot 1$

Coordinance 8

Plans de densité maximale : 6 {110}

Rangées de densité maximale : 4 <111>

Cubique à faces centrées



4 atomes par maille = $8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2}$

Coordinance 12

Plans de densité maximale : 4 {111}

Rangées de densité maximale : 6 <110>

Traitements thermiques - Rappels

⇒ Les sites d'insertion

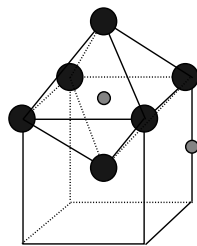
Site octaédrique Oh

6/maille

Dissymétrique

Axe 001 : $r/R=0.154$

Axe 110 : $r/R=0.630$



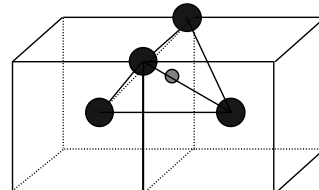
Cubique centré

Site tétraédrique Td

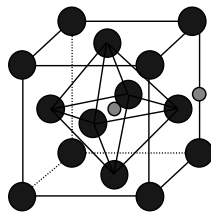
12/maille

Symétrique

$r/R=0.291$



Cubique à faces centrées



Site octaédrique Oh

4/maille

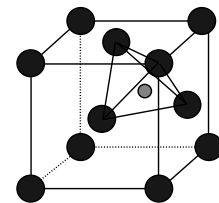
Symétrique

$r/R=0.414$

Site tétraédrique Td

8/maille

Symétrique ($r/R=0.225$)



Traitements thermiques - Rappels

⇒ Solutions solides

⇒ Solubilité en insertion

Atomes présentant un faible rayon atomique

$$r_H = 0.30 \text{ \AA}$$

$$r_C = 0.77 \text{ \AA}$$

$$r_N = 0.71 \text{ \AA}$$

$$r_O = 0.66 \text{ \AA}$$

$$r_B = 0.82 \text{ \AA}$$

Atomes se placent dans les sites où ils introduiraient le moins de déformation possible

Solubilité baisse lorsque le rapport r/R augmente

Ferrite (CC)

Solution solide d'insertion de C dans $Fe\alpha$ (solubilité max.

0,02%)

C dans les sites Oh

Austénite (CFC) (W.C. Roberts-Austen 1843-1902)

Solution solide d'insertion de C dans $Fe\gamma$

C dans les sites Oh

Martensite (Quadratique centrée) (Adolf Martens 1850-1914)

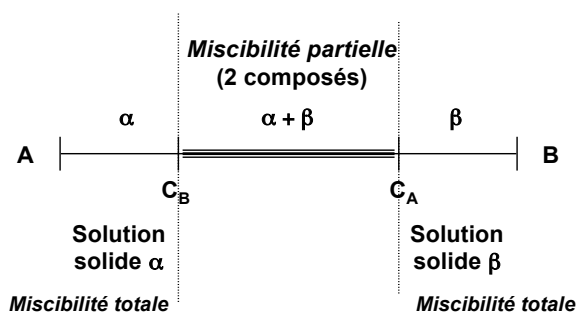
Solution solide d'insertion de C dans $Fe\alpha$ (0,50 à 1,50%)

Sursaturation en carbone → maille devient quadratique en

raison de la position des atomes de C sur les arêtes [001] α

Traitements thermiques - Rappels

⇒ Solution solide de substitution

Règles de Hume-Rothery (1899-1968)

Miscibilité totale entre deux atomes A et B

-même structure cristalline

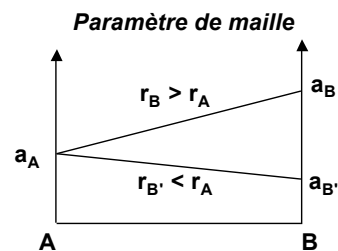
-taille relative des atomes ne diffère pas de plus de 15% (entre 15 et 30%, miscibilité partielle)

-même valence

-électro-négativités proches

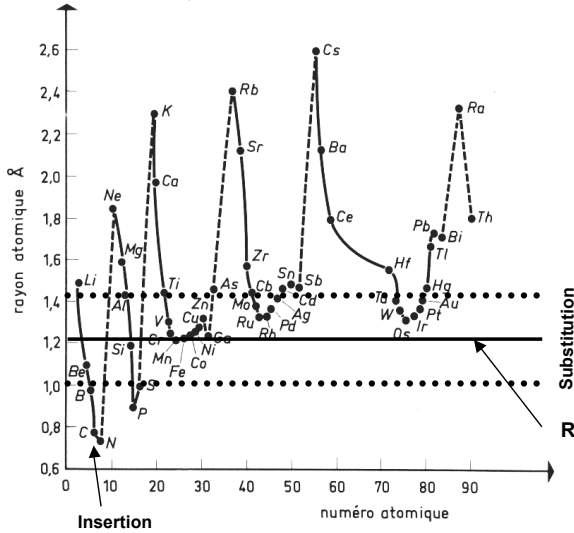
Loi de Vegard

$$r = (1-x) \cdot r_A + x \cdot r_B$$



Traitements thermiques - Rappels

⇒ Atomes en substitution



Règle de Hume-Rothery

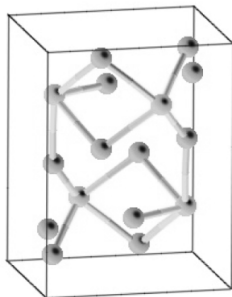
$r_{\text{soluté}}/r_{\text{solvant}} \in [0.85; 1.15]$

Condition nécessaire
mais pas suffisante

⇒ D'autres composés

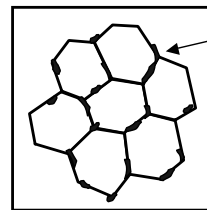
Cémentite Fe_3C

Maille orthorhombique
Hv = 700 - 800 (très grande dureté)
Fragile
 $M_{Fe} = 55.85 \text{ g.mol}^{-1}$
 $M_C = 12 \text{ g.mol}^{-1}$
Soit 6,67% de carbone en masse

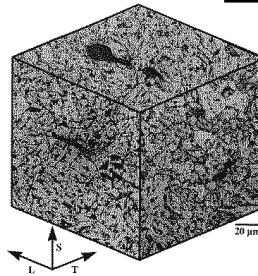


Carbures, carbonitrides

Sulfures



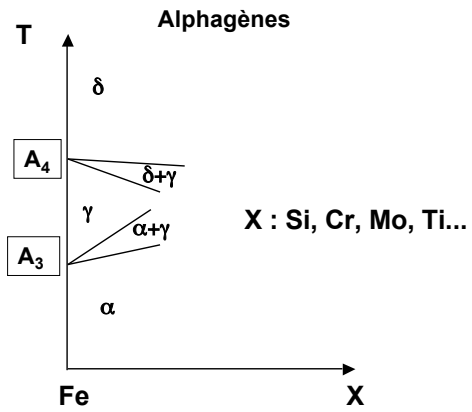
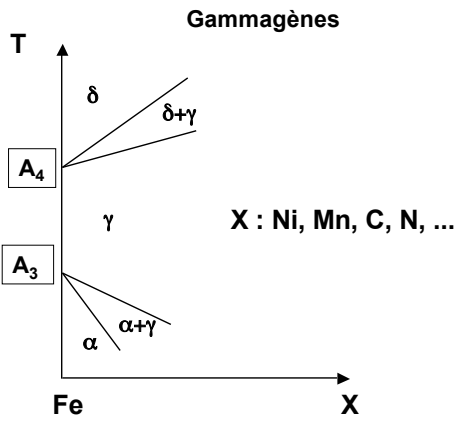
Ségrégation de FeS (structure intergranulaire)



Ségrégation de MnS (intragranulaire, amélioration de l'usinage)

⇒ Précipités modifient les propriétés

⇒ **Éléments alphagènes et gammagènes**



Élargissent le domaine de stabilité de l'austénite et abaissent les températures de transformation

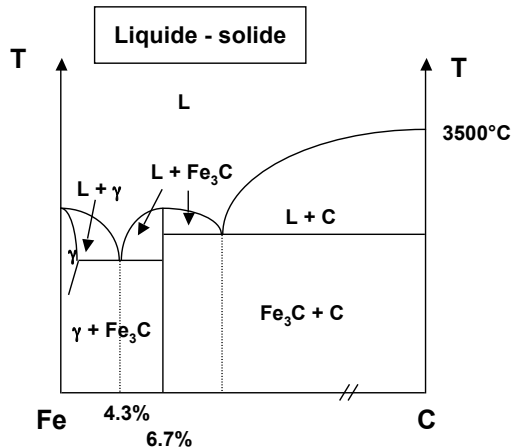
⇒ **Diagramme d'équilibre**

Limitent ou empêchent la formation de l'austénite et élèvent les températures de transformation

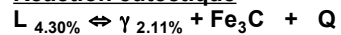
Traitements thermiques - Rappels

Le diagramme Fe-C

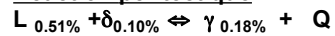
1-2. Le diagramme Fer-Cémentite



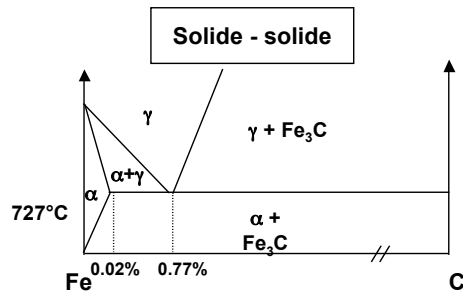
Réaction eutectique



Réaction péritectique



Réaction eutectoïde

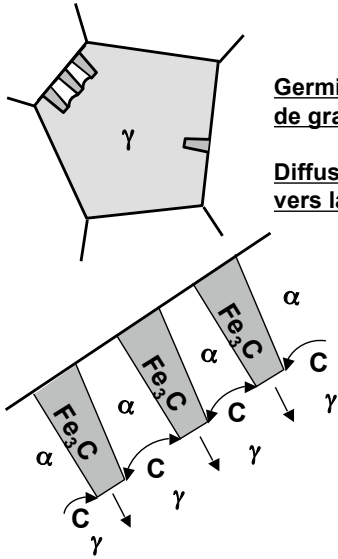


Traitements thermiques - Rappels

Perlite

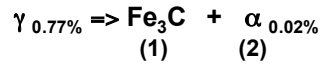
⇒ Transformation perlitique

1-3. Transformations à l'équilibre



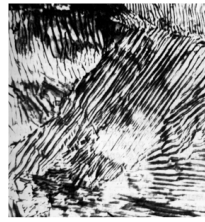
Germination aux joints de grain austénitique

Diffusion du carbone vers la cémentite

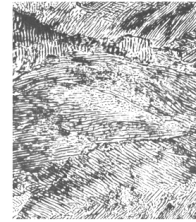


- (1) transformation par diffusion
- (2) transformation allotropique

Perlite grossière



Perlite fine



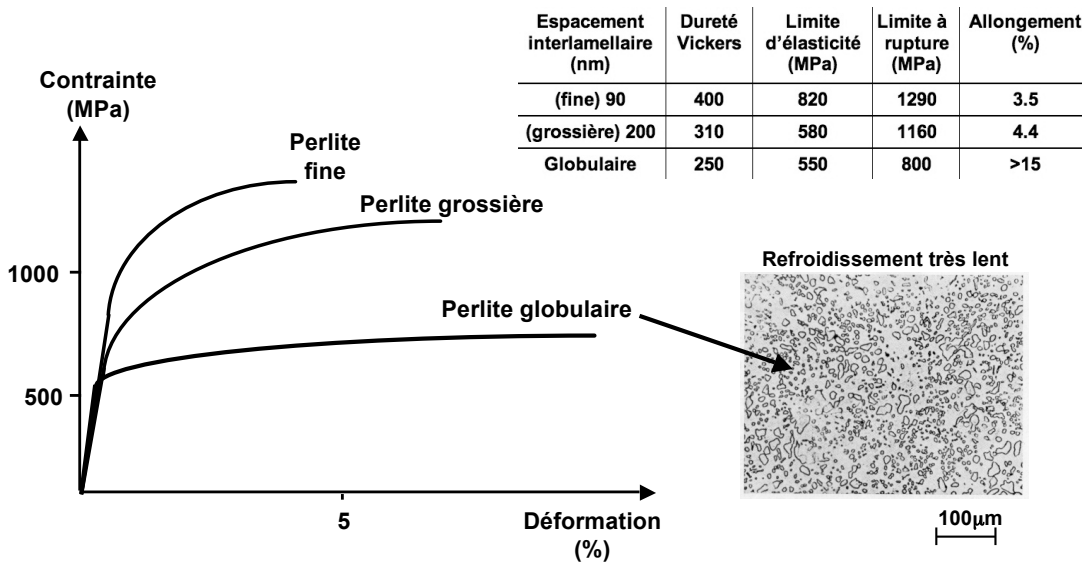
10µm

Distance entre les lamelles diminue lorsque la vitesse de refroidissement augmente
Diffusion des atomes de carbone

Traitements thermiques - Rappels

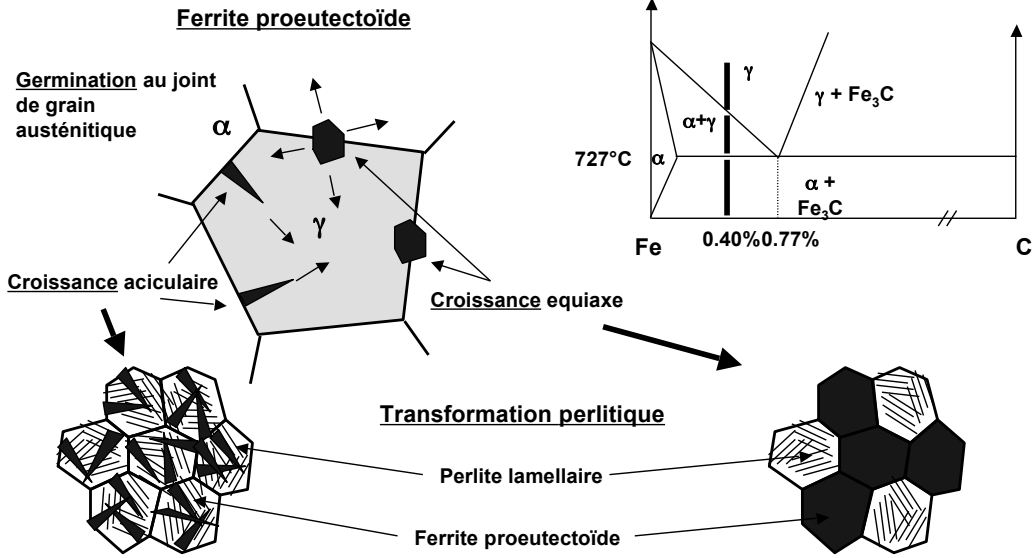
Perlite

⇒ Effet sur les propriétés mécaniques

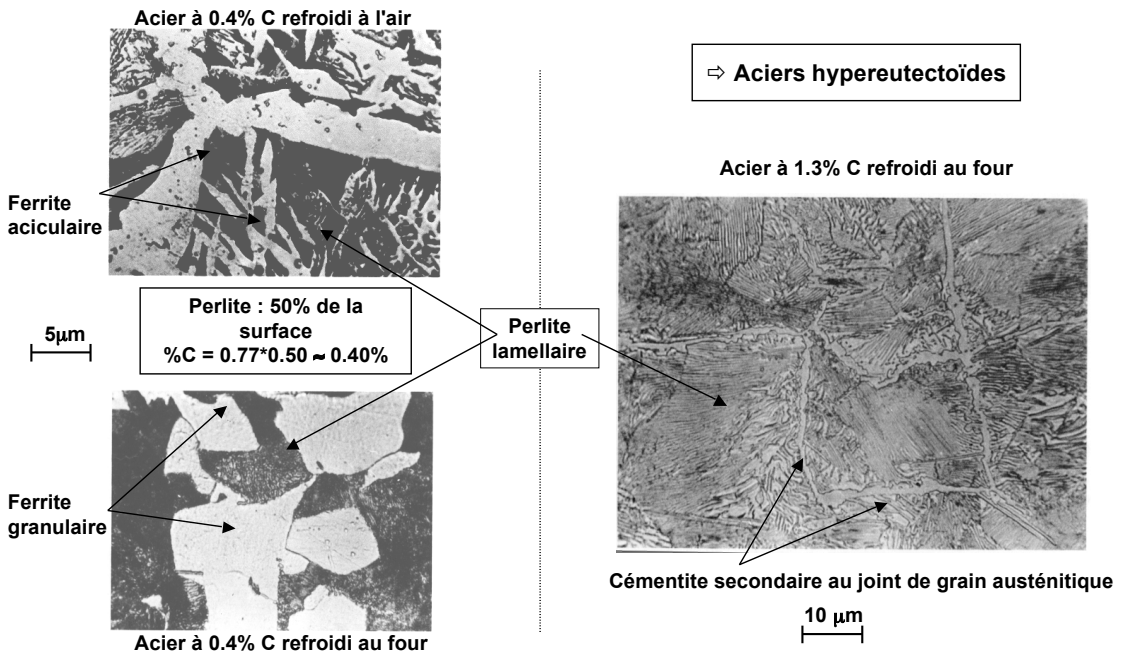


Traitements thermiques - Rappels

⇒ Aciers hypoeutectoïdes



⇒ Aciers hypereutectoïdes

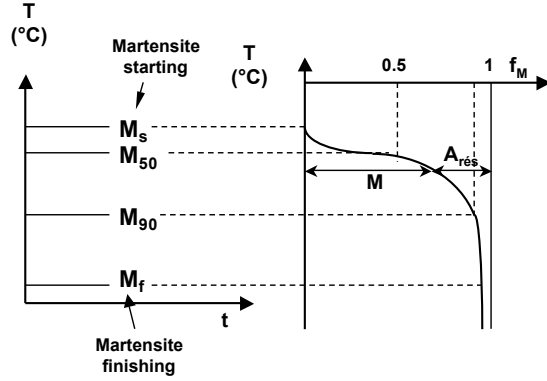


1-4. Structures hors équilibre

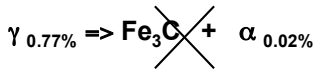
⇒ Transformation martensitique

⇒ Refroidissement très rapide
Transformation quasi instantanée
Sur un grand intervalle de T

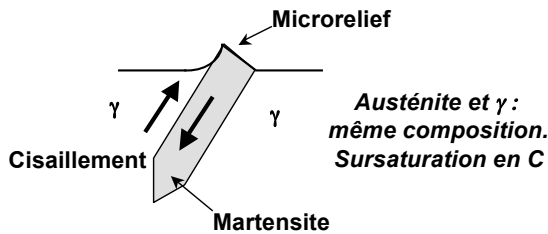
⇒ Austénite résiduelle



⇒ Pas de diffusion (trempe)
Transformation displacive



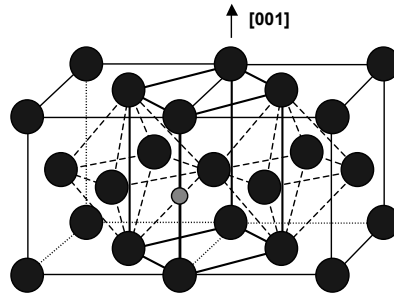
Par cisaillement de l'austénite
Germs induits par des concentration locales
de contraintes
Mouvement coopératif de groupes d'atomes



Compensation du cisaillement par une
déformation supplémentaire
Plastification de l'austénite

⇒ Aspect cristallographique

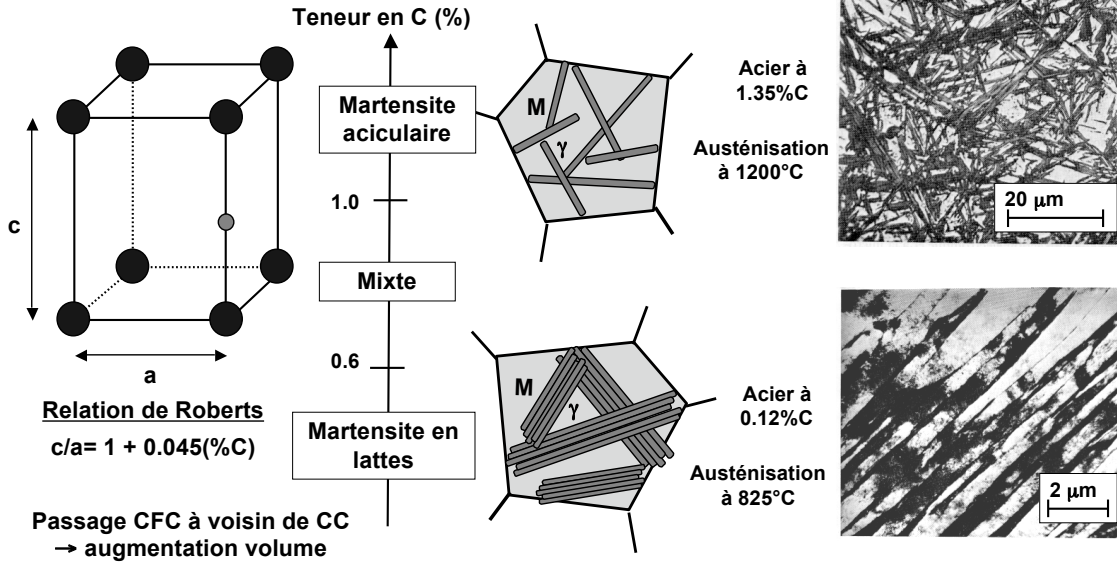
Faible déplacement des atomes de fer
Système quadratique ou tétragonale centrée
très voisin du cube
Peut se former à $V > V_{son}$



Relations d'orientations entre les deux réseaux :
 $\{111\}_A$ parallèle $\{110\}_M$
 $\langle 110 \rangle_A$ parallèle $\langle 111 \rangle_M$

Martensite

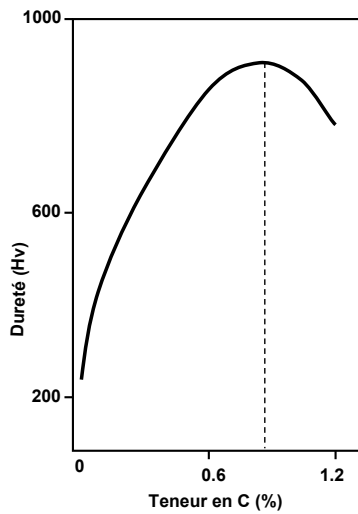
⇒ Microstructure



Traitements thermiques - Rappels

Martensite

⇒ Grande dureté (Hv = 800)

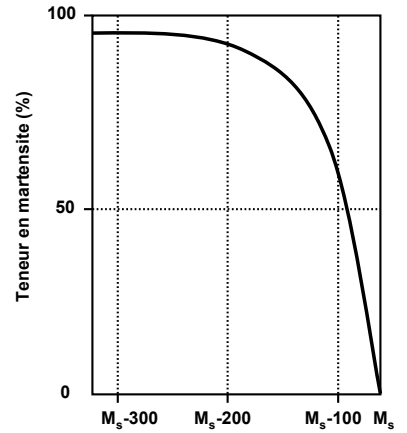


Chaque atome de C, plus volumineux que l'interstice où il est **inséré**, écarte les deux atomes de Fe voisins. Ces perturbations du réseau **bloquent le mouvement des dislocations**.

Dureté augmente avec la teneur en C. A partir de 0.8%, diminution liée à l'austénite résiduelle (transformation incomplète).

⇒ Austénite résiduelle

Relation de Koistinen
 $f_M = 100[1 - \exp[-0.011(M_s - T)]]$
 Indépendante du temps
 Transformation ne peut être totale



Température d'arrêt du refroidissement

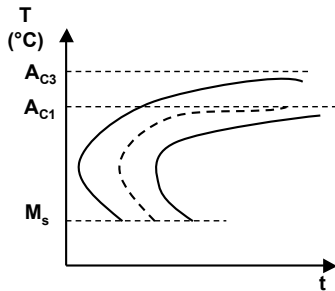
Traitements thermiques - Rappels

Bainite

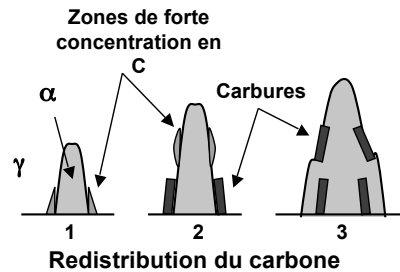
⇒ Transformation bainitique

⇒ Maintien isotherme

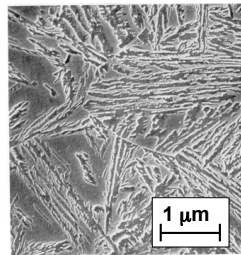
Diffusion à courte distance
Transformation dans une zone
intermédiaire du 'nez' perlitique et M_s



⇒ Modèle de formation de la bainite



Acier à 0.44%C



Précipitation de petits
nodules de Fe_3C qui
sont alignés dans la
direction de
croissance des
aiguilles de ferrite

Traitements thermiques - Rappels

Normalisation

Désignation conventionnelle

⇒ Acier non allié sans traitement thermique

- ⇒ 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, $R_e \geq 355$ MPa, état normalisé

⇒ Acier non allié pour traitement thermique

CXX : lettre C suivi de la teneur en C x 100
C48 : acier avec une teneur en C de 0,48%

Désignation normalisée

⇒ 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

Traitements thermiques