

Enseignement Matériaux - 2ème année

UEF MATA

Transformation et Comportement des Matériaux

Partie 'Traitement thermique des alliages'

J.E. Masse 2019-2020

Traitements thermiques des alliages

1- Rappels et prérequis

1-1. Le fer 'pur'

1-2. Le diagramme fer-carbone

1-3. Structures hors de l'équilibre

1-4. Résumé

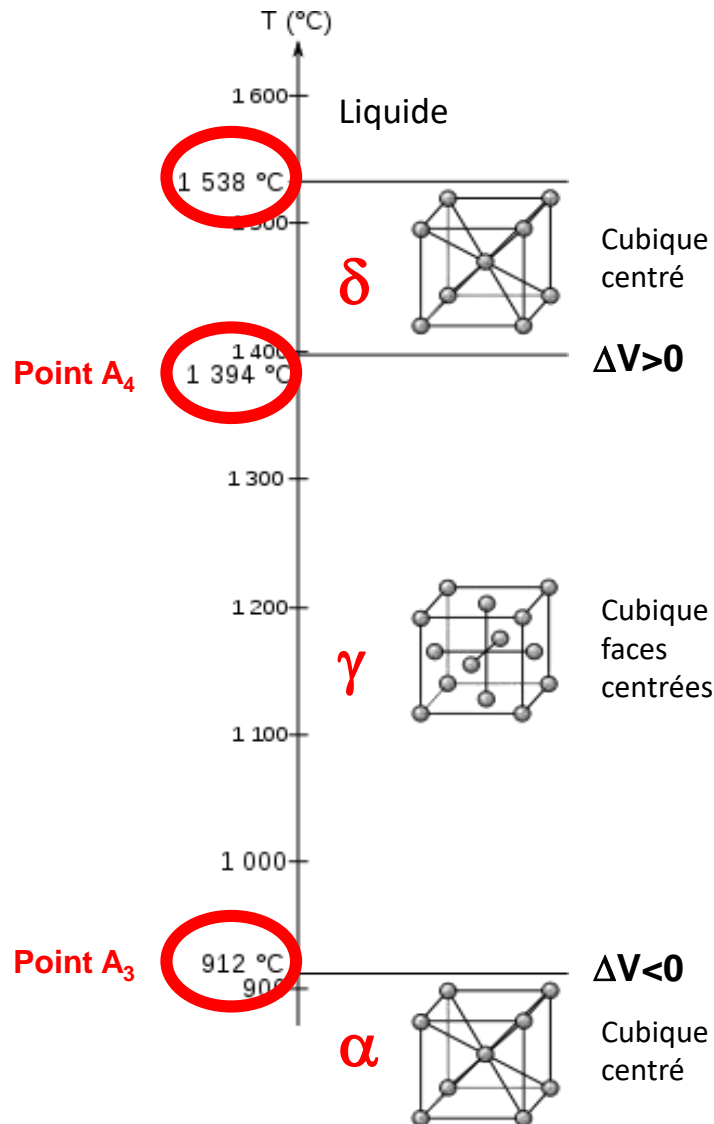
2- Transformations au chauffage

3- Transformations de l'austénite

4- Transformations au revenu

5- Applications des traitements thermiques

1-1. Le fer 'pur'



Par importance, le 4^{ème} élément de l'écorce terrestre
Sous forme :

- **Native** : météorites
- **Minerais** : oxyde, sulfure, carbonate, nitrate, silicate

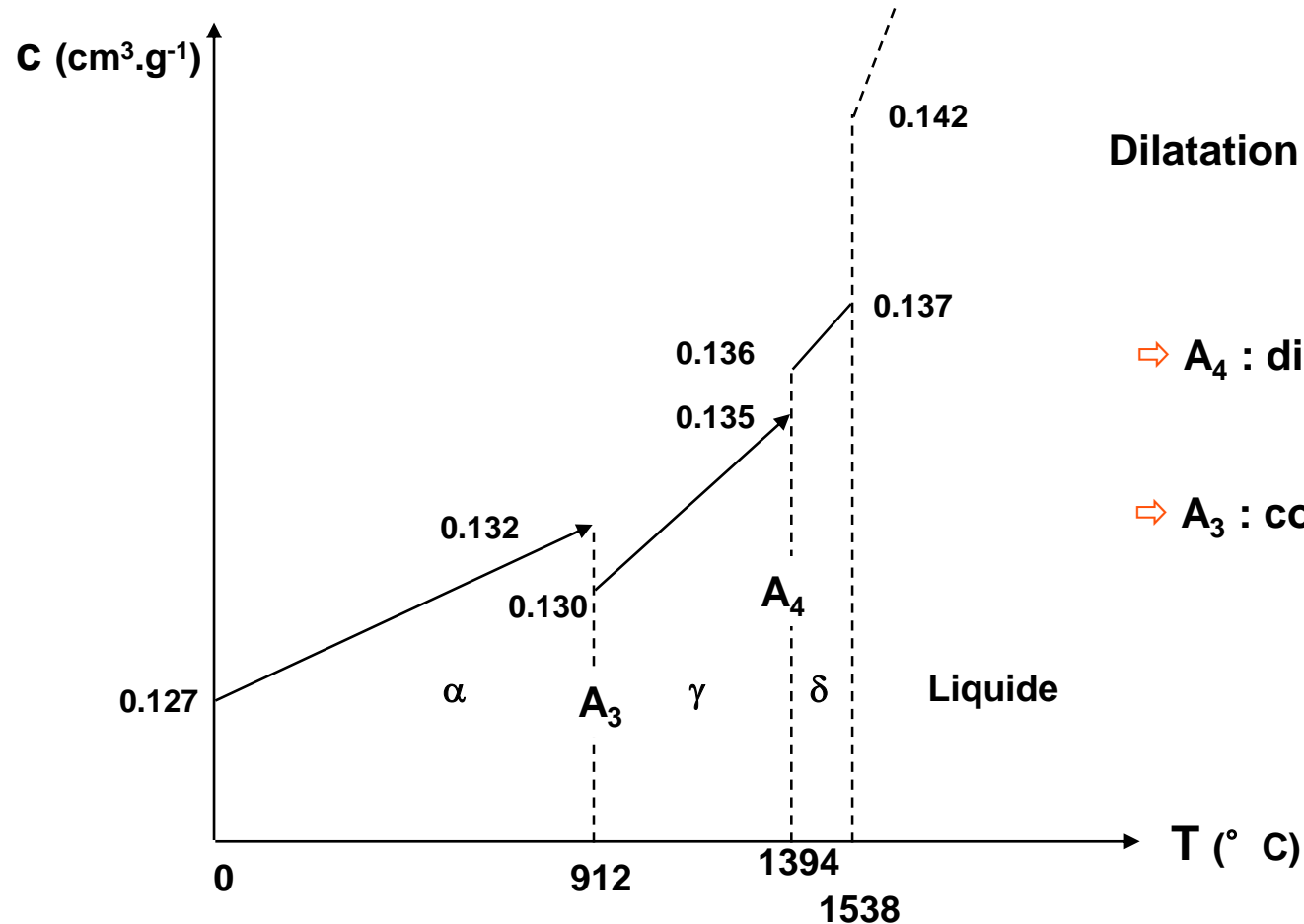
Faible résistance à la traction : 120 MPa (acier de base \approx 350 MPa)

- Points de transformation
- α Forme allotropique



1-1. Le fer 'pur'

Volume augmente avec la température



Dilatation en volume à la fusion 3.58 %

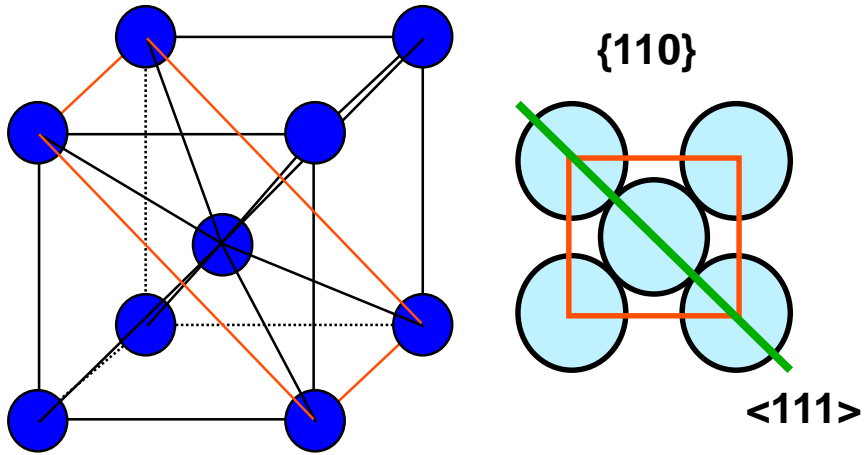
⇒ A_4 : dilatation en volume 0.54 %

⇒ A_3 : contraction en volume 1.03 %

1-1. Le fer 'pur'

⇒ Les réseaux cristallins du fer « pur »

Cubique centré



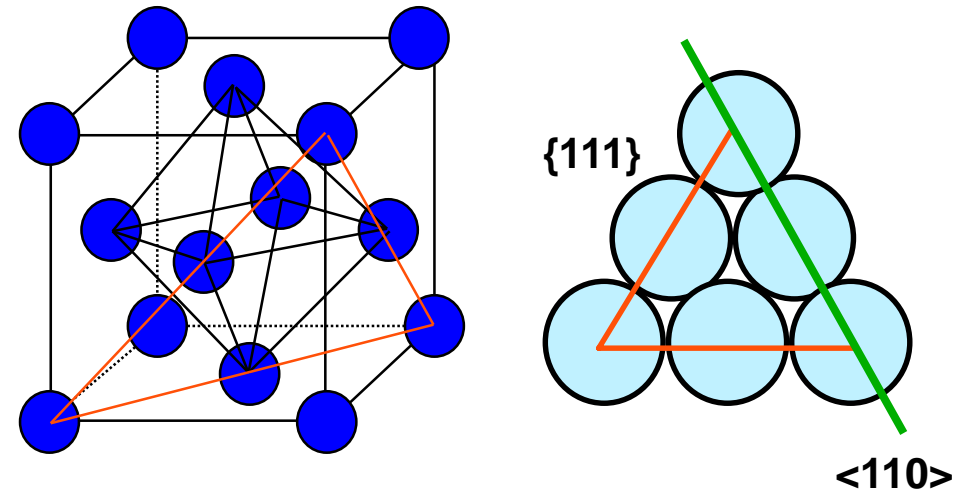
2 atomes par maille = $8 \cdot \frac{1}{8} + 1 \cdot 1$

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}

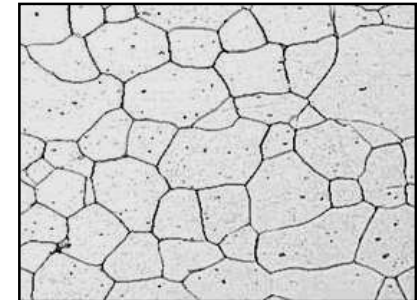
Rangées de densité maximale : 6 <110>

1-2. Le diagramme fer-carbone

⇒ Ajout de carbone (C) dans le fer ⇒ Création de nouvelles phases

La Ferrite (structure CC) (1)

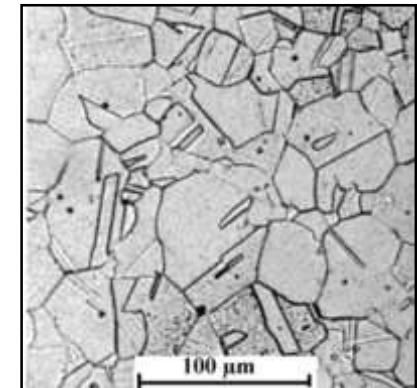
Solution solide d'insertion de C dans la phase α du Fe (solubilité max. 0,02%)



(1)

L'Austénite (structure CFC) (2)

Solution solide d'insertion de C dans la phase γ du Fe (solubilité max. 2,1%)



(2)

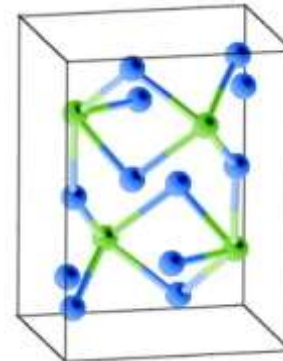
La Cémentite (structure Orthorhombique) (3)

Formule Fe_3C

Très grande dureté HV = 700 - 800

Fragile

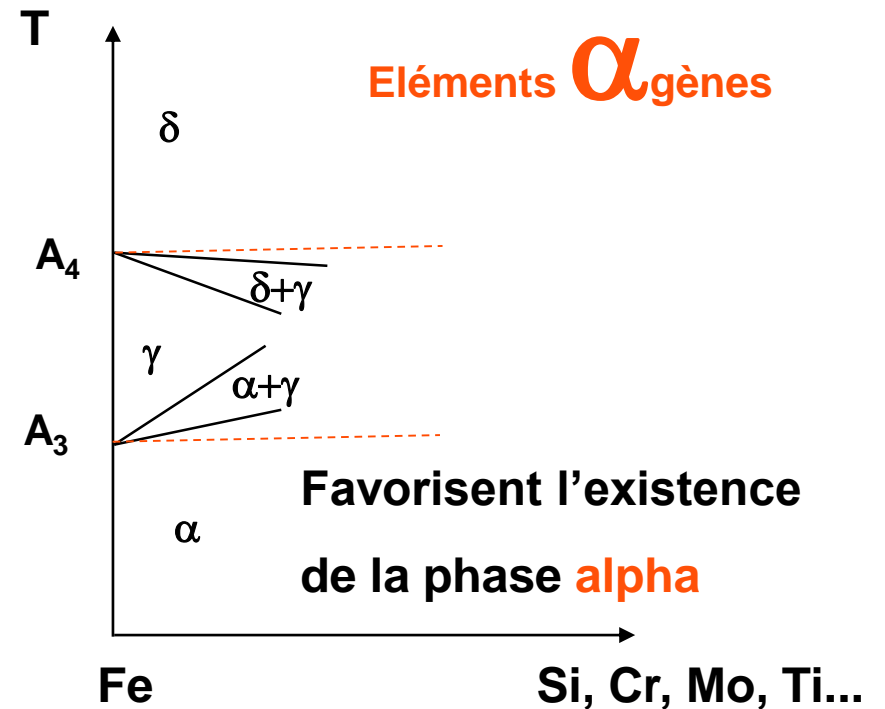
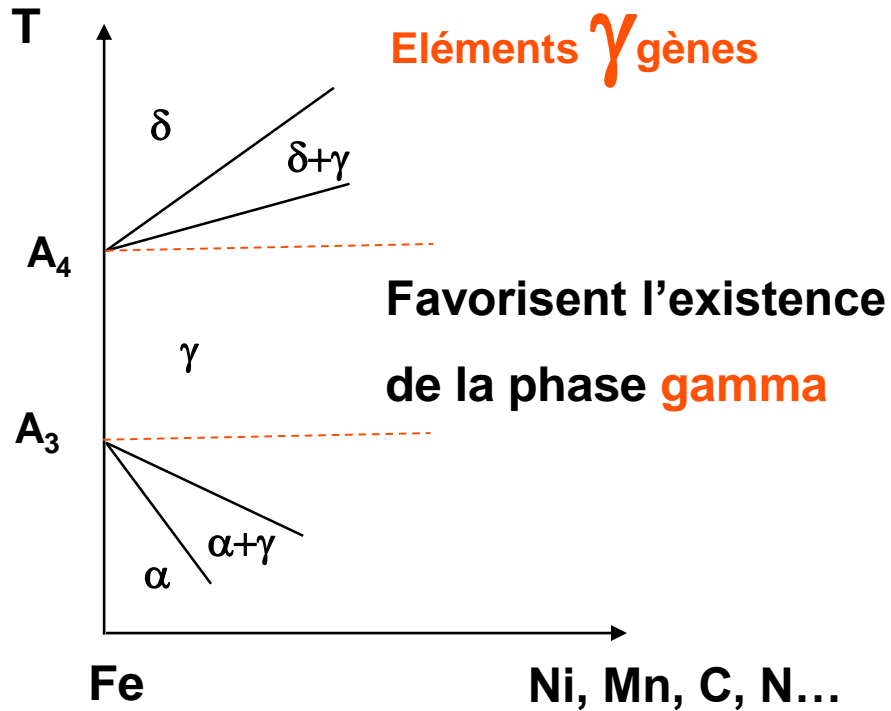
6,67% de carbone et 93,3% de fer (en masse)



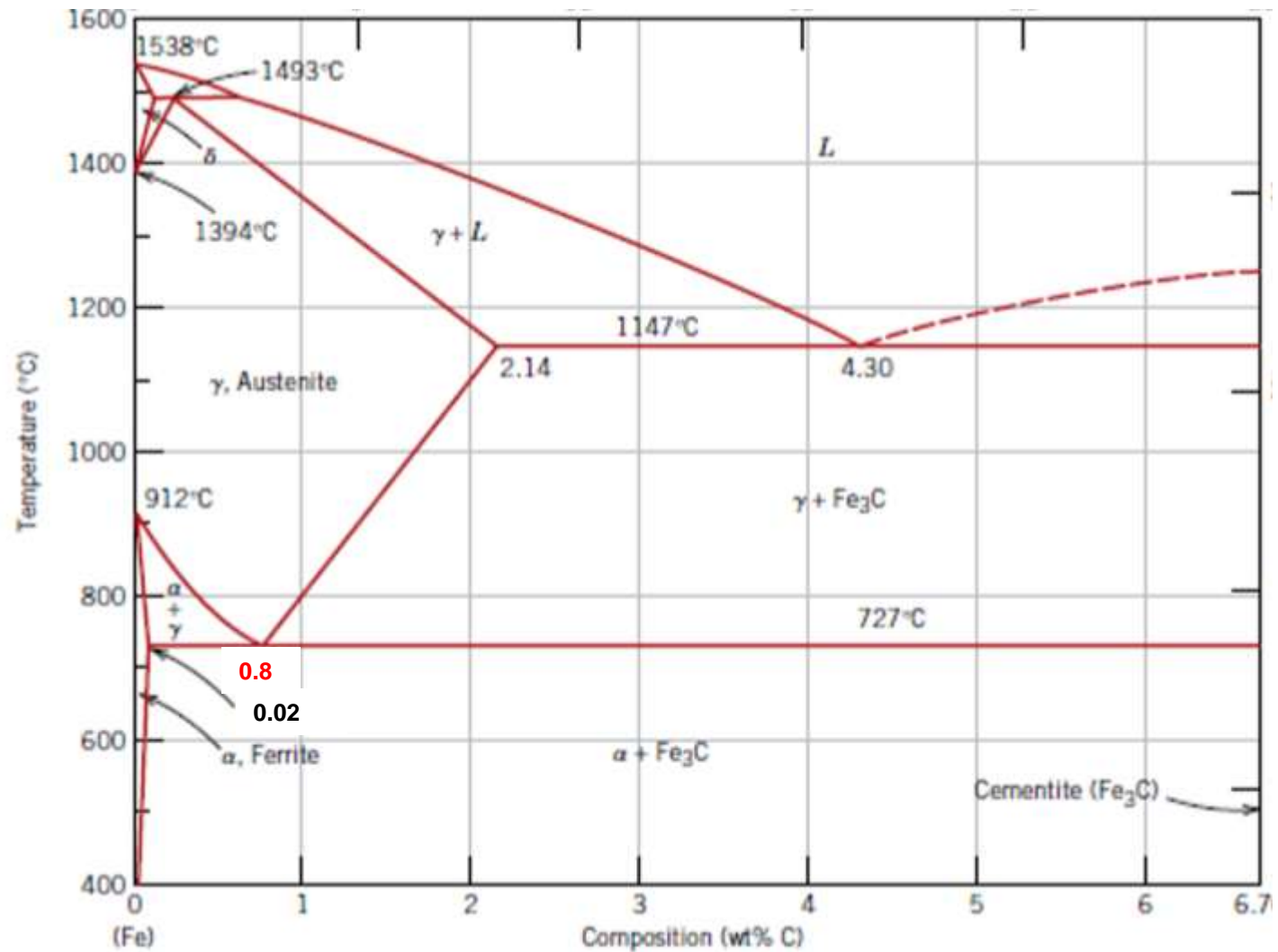
(3)

1-2. Le diagramme fer-carbone

⇒ Influence des éléments d'addition potentiels sur les températures de transformation du fer



1-2. Le diagramme fer-carbone



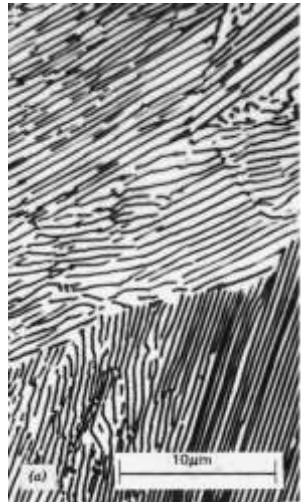
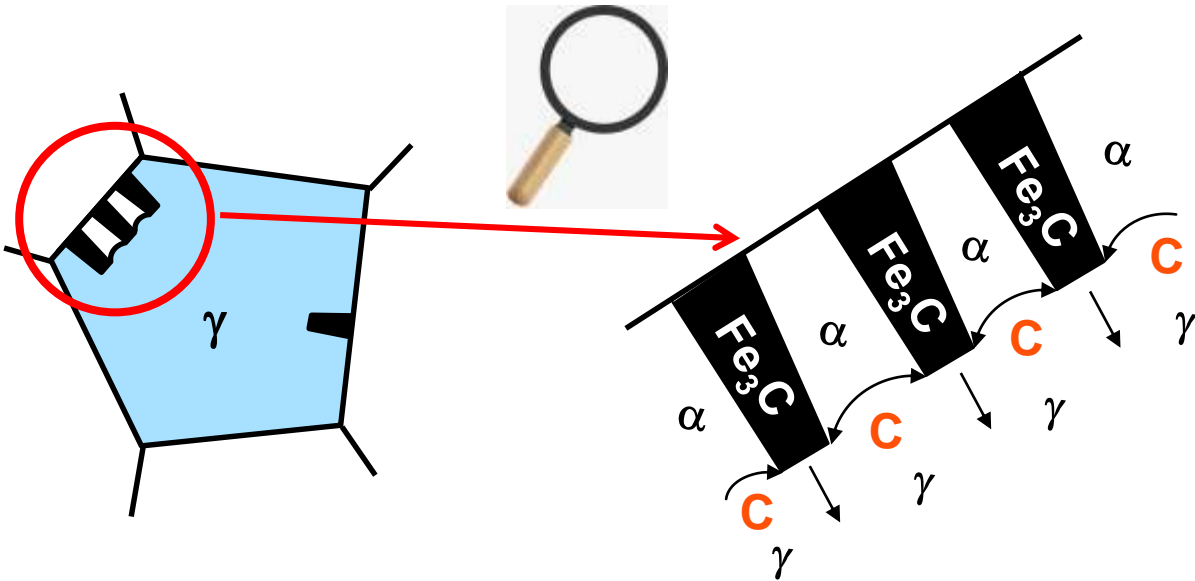
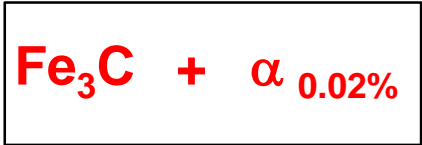
Acier :
 $0 < \%C < 2,1$

Fonte :
 $2,1 < \%C < 6,7$

1-2. Le diagramme fer-carbone

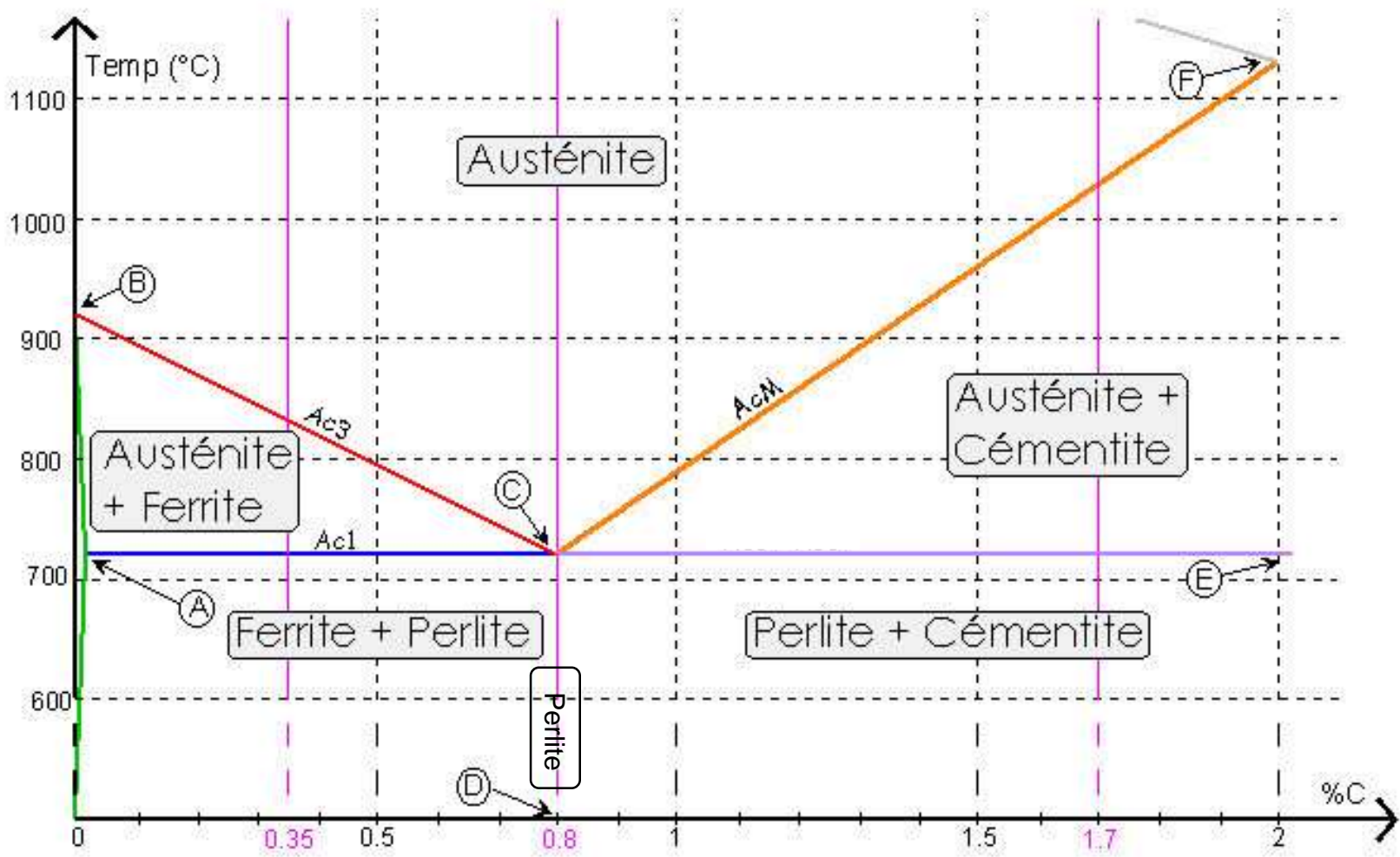
⇒ Pour 0,8% de carbone à 727° C : réaction particulière

Réaction eutectoïde



Le composé eutectoïde lamellaire ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) se nomme **la perlite**

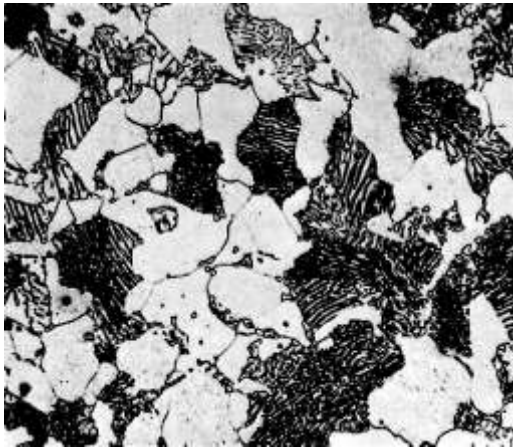
1-2. Le diagramme fer-carbone



1-2. Le diagramme fer-carbone

⇒ Aciers hypoeutectoides

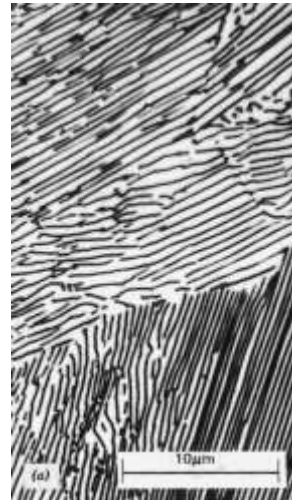
$\%C < 0,8\%$



Ferrite (polygone blanc) + perlite

⇒ Acier eutectoïde

$\%C = 0,8\%$



Perlite

⇒ Aciers hypereutectoides

$0,8\% < \%C < 2,1\%$



Cémentite (liseré blanc) + perlite

1-3. Structures HORS DE L'EQUILIBRE

⇒ Transformation martensitique



Important!

- ⇒ Le refroidissement très rapide de l'austénite (HORS DES CONDITIONS D'EQUILIBRE) entraîne la création de composés hors équilibres (**donc absent du diagramme d'équilibre**)
- ⇒ Transformation SOUVENT incomplète (non terminée à la température ambiante) donc présence d'austénite NON ENCORE TRANSFORMEE (austénite qualifiée de '**résiduelle**')
- ⇒ Si vitesse **suffisamment rapide**, pas de diffusion donc pas de création de cémentite (Fe_3C) : transformation que l'on appelle « **displacive** » (MOUVEMENT COLLECTIF DES ATOMES SUR DES COURTES DISTANCES, INFÉRIEURES A LA DISTANCE INTERATOMIQUE)
- ⇒ Création d'une nouvelle phase : **la MARTENSITE***

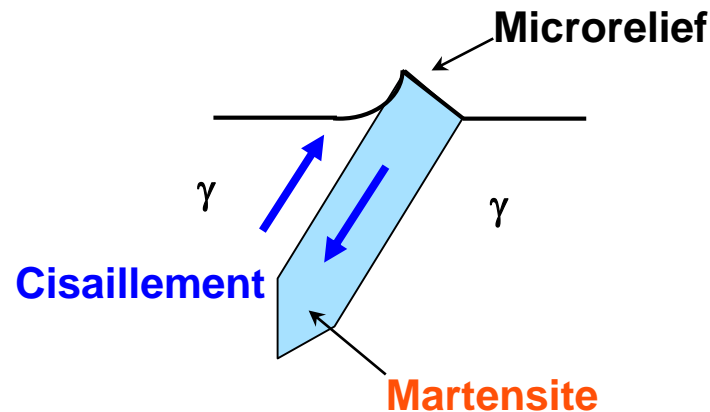
* Elle tire son nom de Adolf Martens (1850 - 1914), métallurgiste allemand.

⇒ Transformation martensitique

⇒ Pas de diffusion : transformation displacive



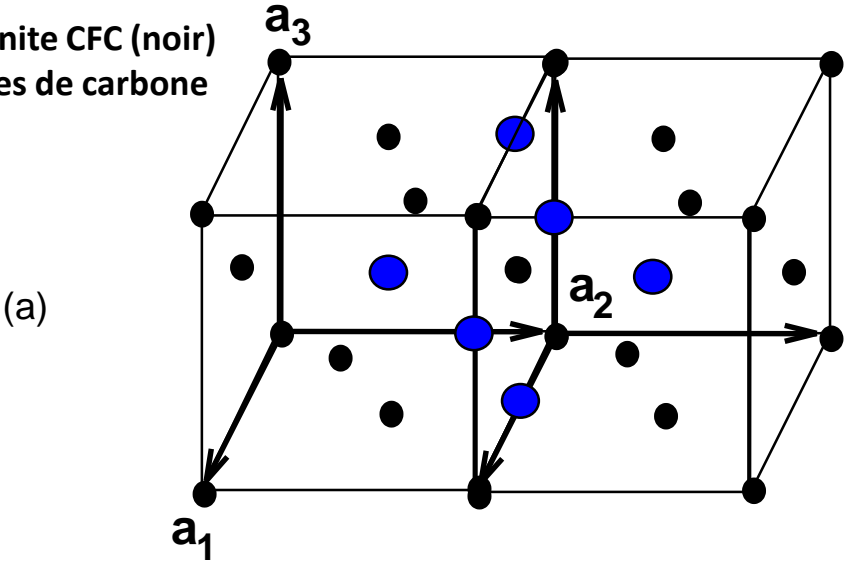
- Cisaillement de l'austénite
- Germes induits par des concentration locales de contraintes
- Mouvement coopératif de groupes d'atomes (transformation displacive ou « militaire »)



**Austénite et Martensite :
même composition.
Sursaturation en carbone de
la martensite**

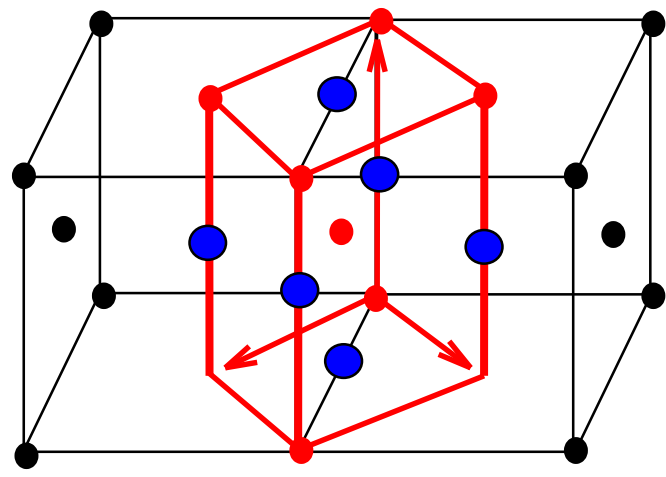
- Compensation du cisaillement par une déformation supplémentaire
- Plastification de l'austénite

Austénite CFC (noir)
Atomes de carbone (bleu)

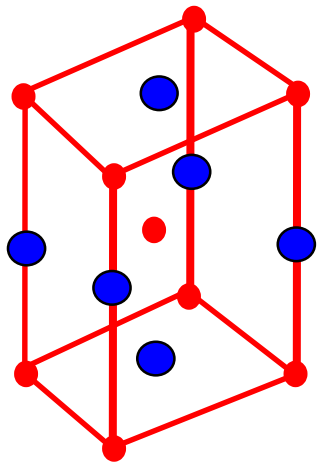


Refroidissement rapide

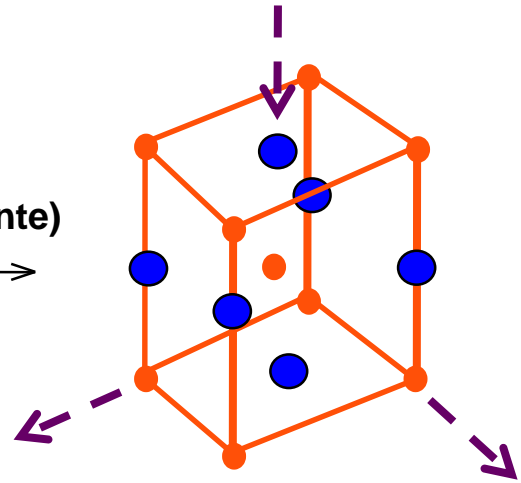
Nouvel arrangement des atomes (réseau rouge)



Structure tétragonale centrée (appelée aussi quadratique centrée)



(contrainte)



Martensite Pseudo cubique centrée

Austénite et Martensite :
même composition.
Conséquence :
Sursaturation en carbone de
la martensite

Martensite

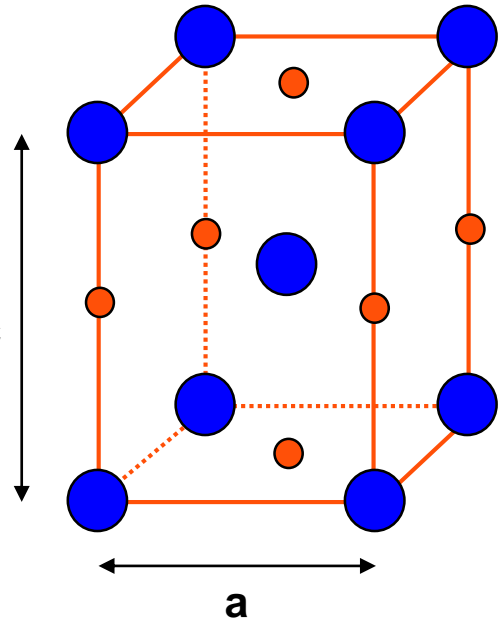
Teneur en C (%)

⇒ Microstructure

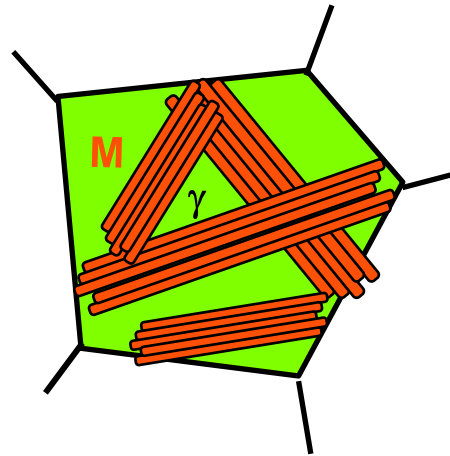
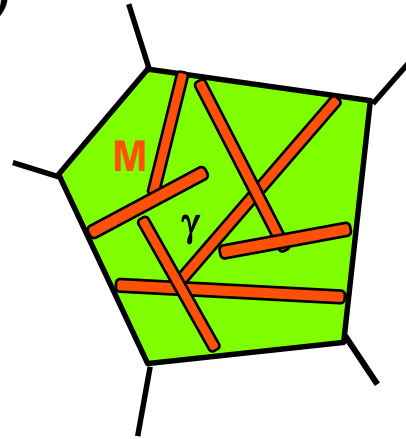
Martensite aciculaire

0.8

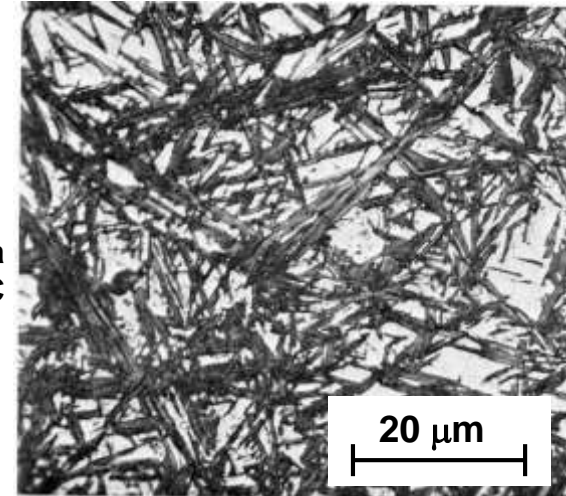
Martensite en lattes



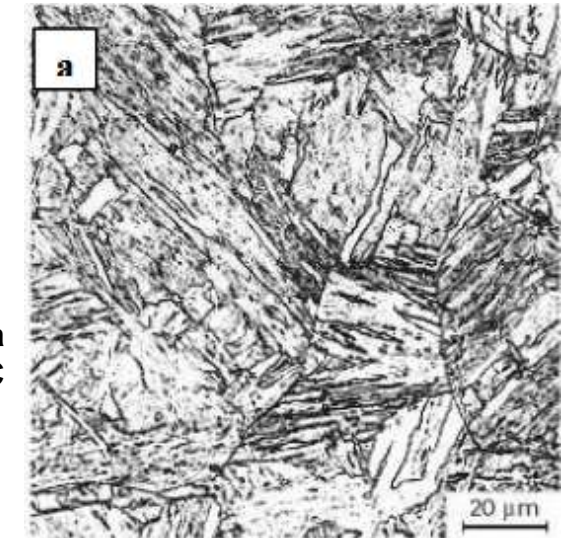
$$c/a = 1 + 0,045 \times (\%C)$$



Acier à 1.35%C

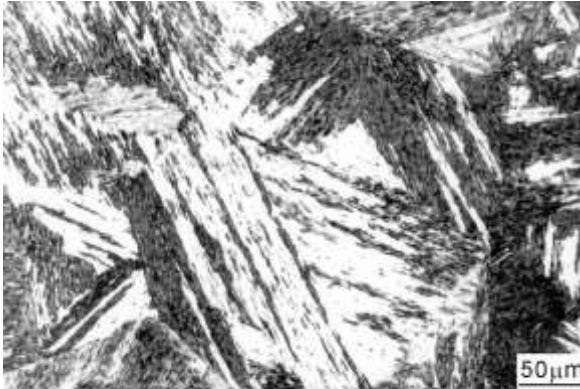


Acier à 0.12%C



où %C représente la teneur en carbone
(relation de Roberts)

⇒ Martensite en lattes



Optical micrograph

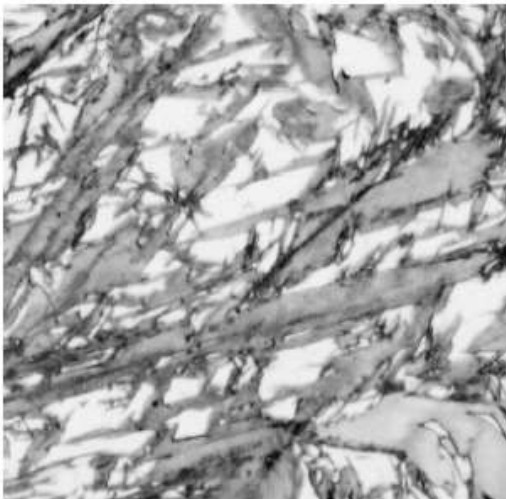


TEM micrograph



⇒ Martensite en aiguille (aciculaire)

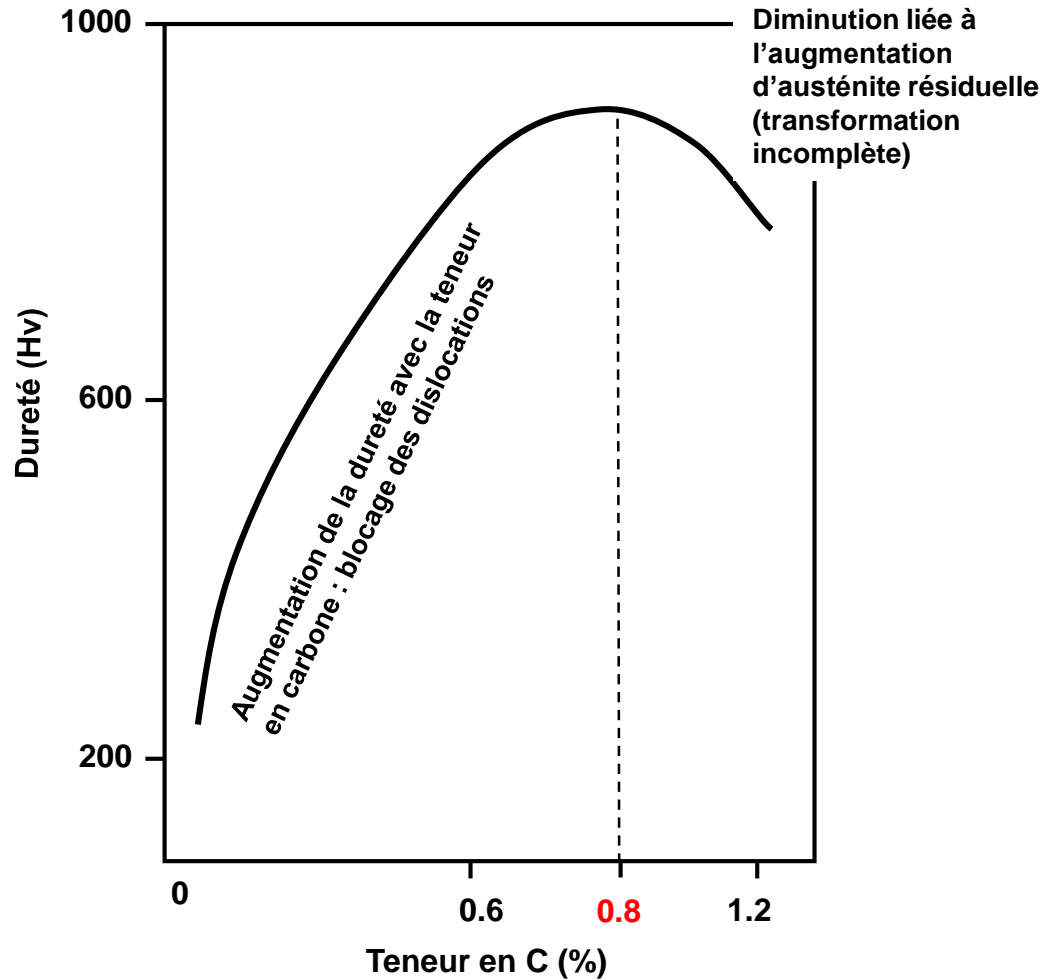
Alliage Fer-Carbone à 0,8%C



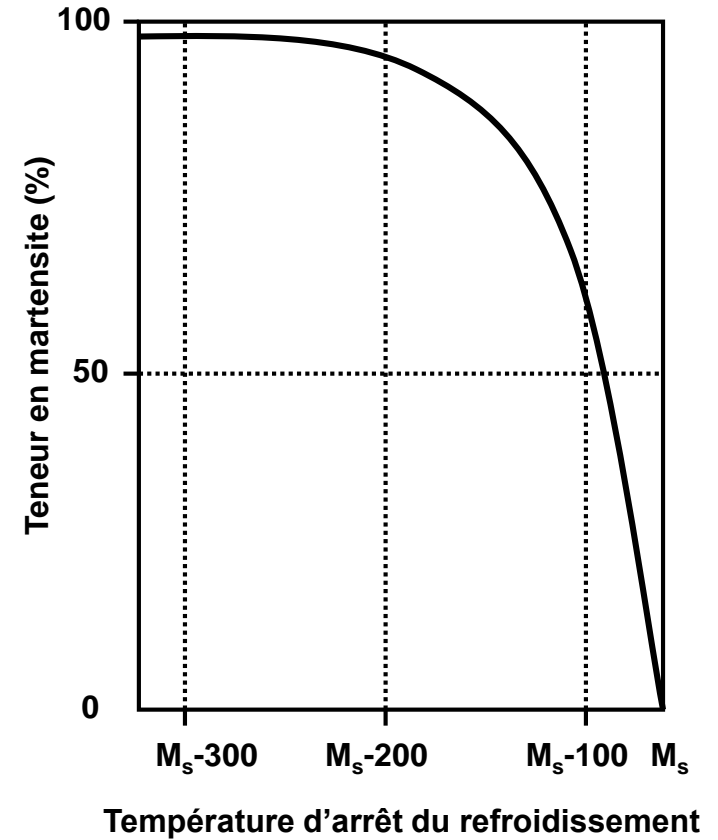
Aiguilles martensite (noir) dans matrice austénitique (x 1000)



⇒ MARTENSITE : grande dureté (dureté Vickers > 800)



⇒ Austénite résiduelle



M_s : martensite start = température d'apparition de la martensite

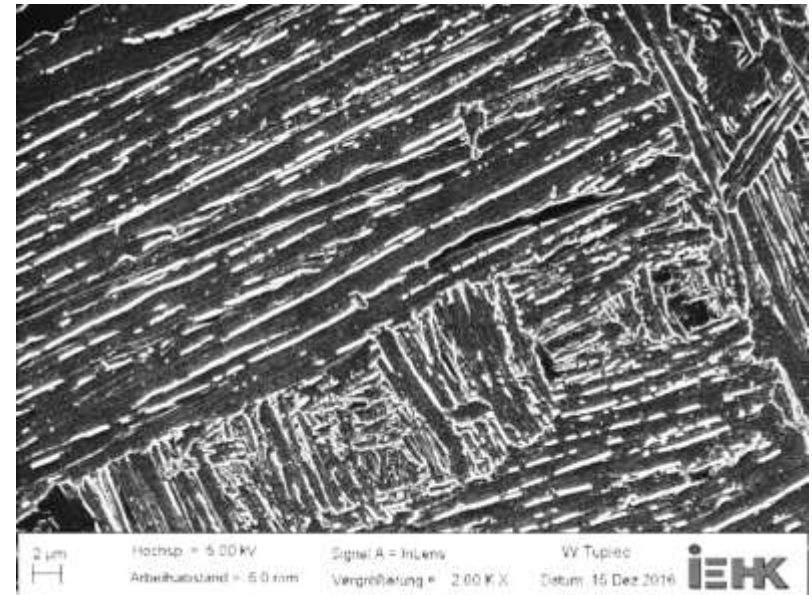
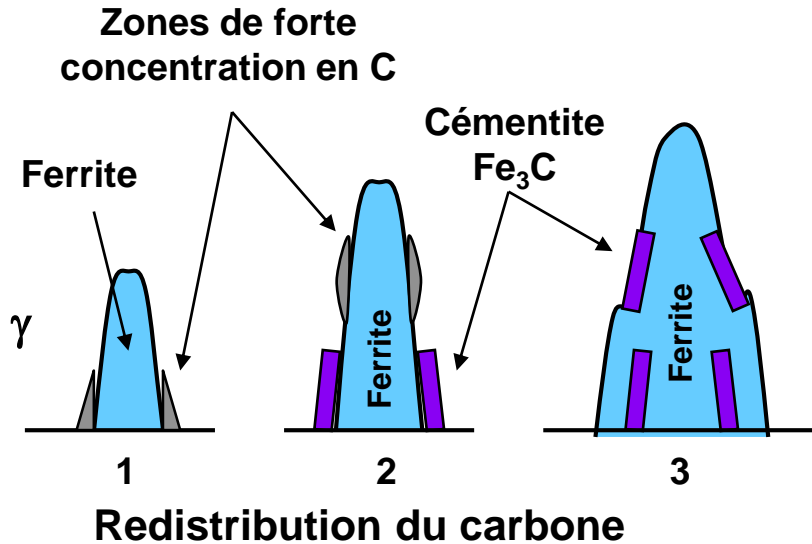
1-3. Structures HORS DE L'EQUILIBRE

Important!

⇒ Transformation bainitique

Si refroidissements trop rapides pour la formation de perlite, mais pas assez pour permettre celle de martensite, formation d'une structure intermédiaire : la **BAINITE*** (ferrite + cémentite).

⇒ Formation de bainite

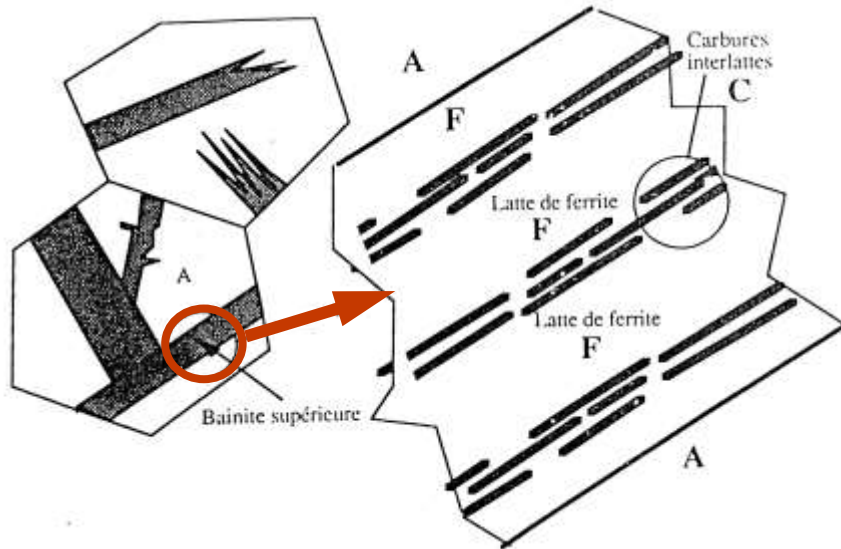


Précipitation de petits nodules de Fe_3C (blanc) dans des aiguilles de ferrite (noir)

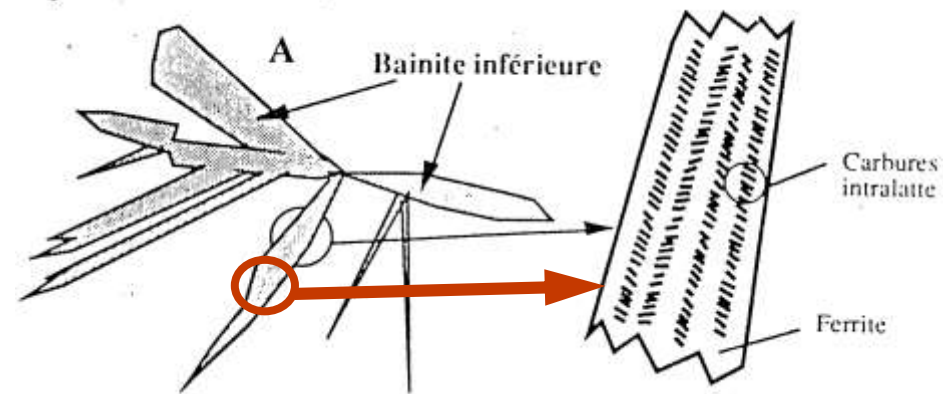
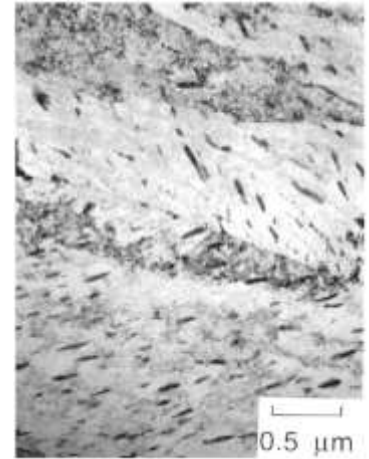
* La BAINITE est ainsi nommée en hommage à Edgar Bain (1891 – 1971) donc on écrit Bainite et non Bénite !

⇒ Transformation bainitique

Source : H. K. D. H. Bhadeshia, *Bainite in Steels*, 2001



Bainite supérieure
Ferrite formée en lattes et précipitation
des carbures (interlattes)



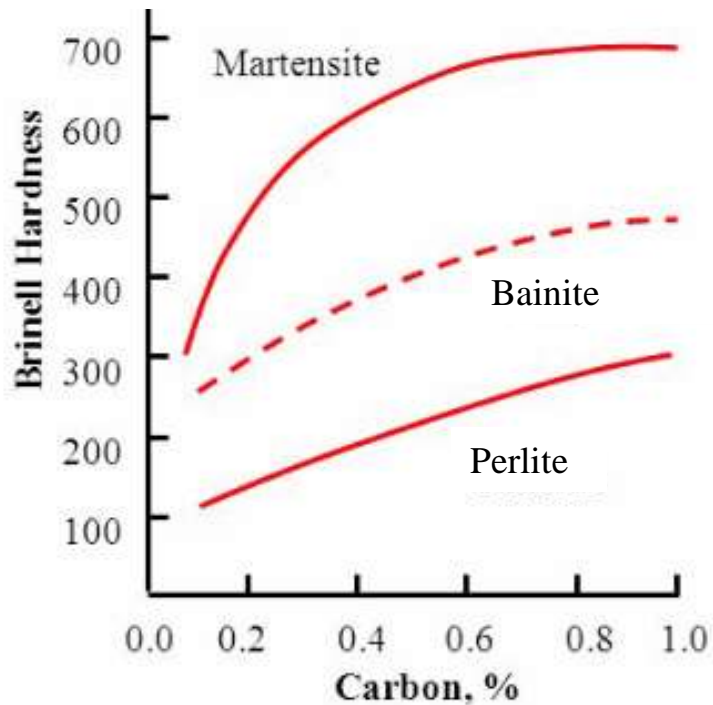
Bainite inférieure
Précipitation de la cémentite dans les
plaques de ferrite

1-3. Structures HORS DE L'EQUILIBRE

⇒ Transformation bainitique

Important!

Des propriétés intermédiaires entre la perlite et la martensite...



Propriétés mécaniques d'un acier à 0,8%C		
Constituant	Dureté (HRC)	Limite à rupture (MPa)
Perlite grossière	16	700
Perlite fine	30	980
Bainite	45	1450
Martensite	65	-
Martensite (après adoucissement)	55	1990

1-4. Résumé

Dans le cas où la vitesse de refroidissement d'un acier est suffisamment rapide, les phénomènes diffusionnels à l'origine des transformations de phases ne peuvent se produire car les équilibres thermodynamiques ne sont pas continûment atteints. Ce type de transformation donne naissance à des **composés hors d'équilibre (qui ne figurent pas sur les diagrammes de phases)**. Ces transformations correspondent à des mouvements collectifs d'atomes sur des distances inférieures à la distance interatomique. **On les appelle transformations par cisaillement ou displacives (par déplacement).**

Dans le cas d'un acier (de par l'existence dans le fer de transformations allotropiques traduisant des changements de structure cristalline selon la température) la phase mère cristalline, **l'austénite, se transforme lors d'un refroidissement suffisamment rapide en une autre structure cristalline appelée martensite.**

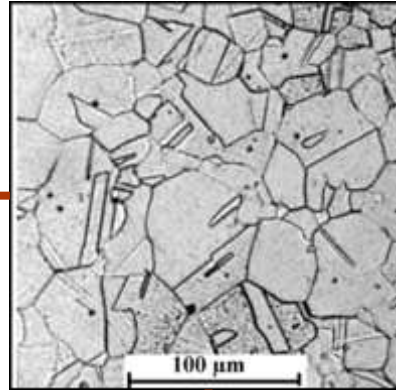
Si la vitesse de refroidissement est suffisante, la quantité de martensite formée ne dépend que de la température atteinte. Si celle-ci est suffisamment basse, le matériau se transforme entièrement. Sinon seule une certaine fraction volumique est transformée. Il reste alors de l'austénite que l'on qualifie de résiduelle.

Des structures intermédiaires peuvent également être obtenues **lors de refroidissements trop rapides pour permettre la formation de perlite, mais pas assez pour permettre celle de martensite.** A la place se forment de fins agrégats de plaquettes de ferrite et de particules de cémentite. Ces structures intermédiaires sont communément nommées **bainite**.

1-4. Résumé

⇒ Transformations d'un acier avec C < 0,8% mas.

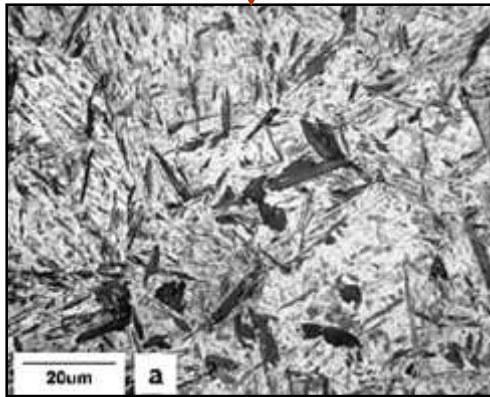
Austénite



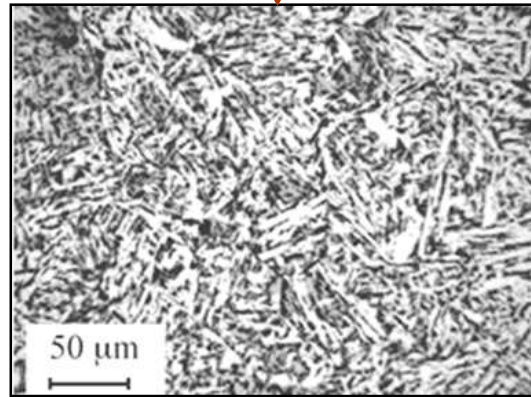
Refroidissement
« rapide » : trempe

Refroidissement
« lent »

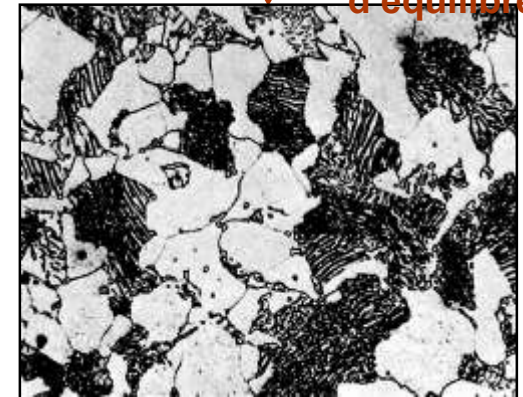
Refroidissements « intermédiaires »



Martensite
(+ austénite résiduelle)



Bainite (ferrite + cémentite)



Ferrite et
perlite (ferrite + cémentite)

Composés hors d'équilibre