

Métaux -

VI. Traitements thermiques (trempe et microstructures hors équilibre)

Anne Mertens

Rappel : les alliages

Systèmes binaires AB

- Mélanges : cristaux de A et cristaux de B
- Solutions solides : le B se dissout dans les cristaux de A. Il y a solvant et soluté
- Combinaisons intermétalliques :
 - Combinaisons : formation de cristaux de A_xB_y ayant un réseau différent de A et de B (ionique ou covalent).
 - Intermétalliques : conserve un caractère métallique (électrons libres)

Rappel : les alliages

La structure à l'équilibre des alliages est définie par la thermodynamique:

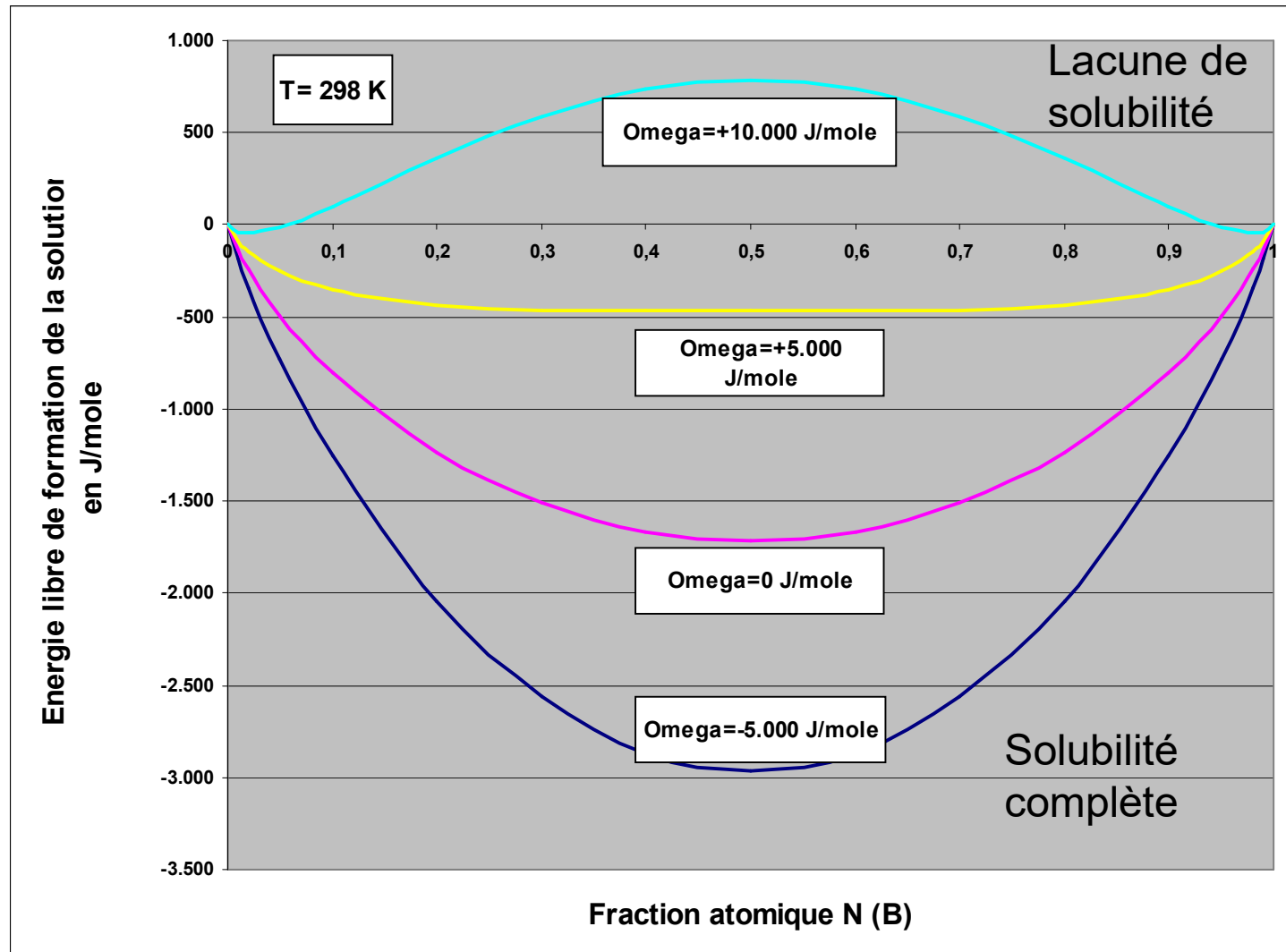
Energie libre des solutions à l'état solide.

$$G = N_A G_A + N_B G_B + \Delta G_{\text{solution}}$$

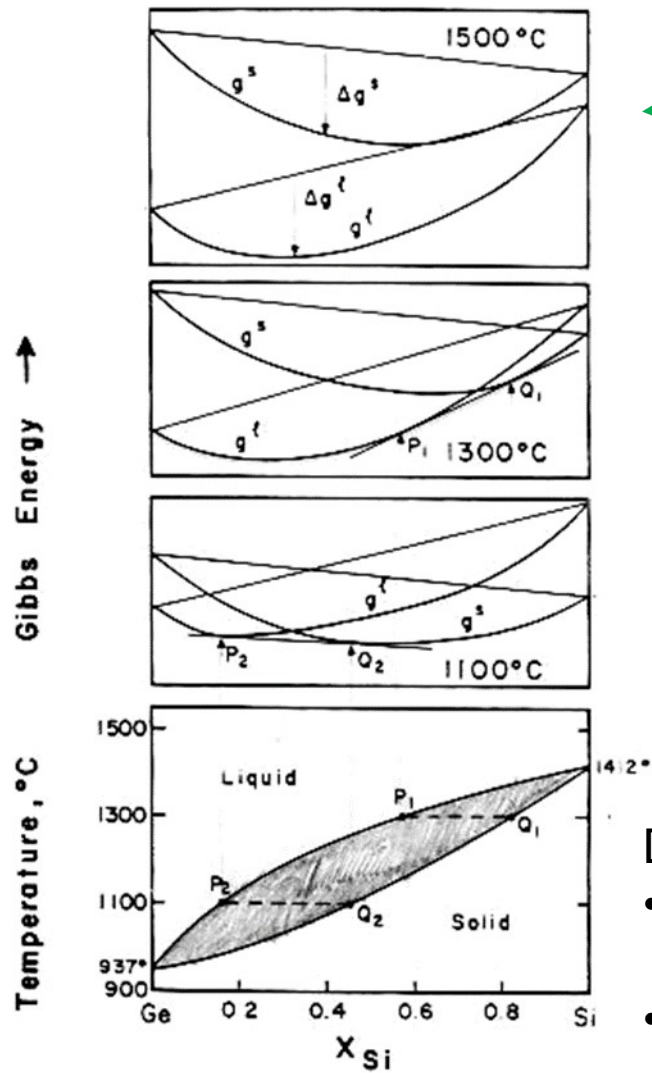
devient ainsi

$$G = N_A G_A + N_B G_B + \underbrace{\Omega N_A N_B}_{\Delta H_{\text{solution}}} + \underbrace{RT(N_A \ln N_A + N_B \ln N_B)}_{\Delta S_{\text{solution}}}$$

Rappel : les alliages



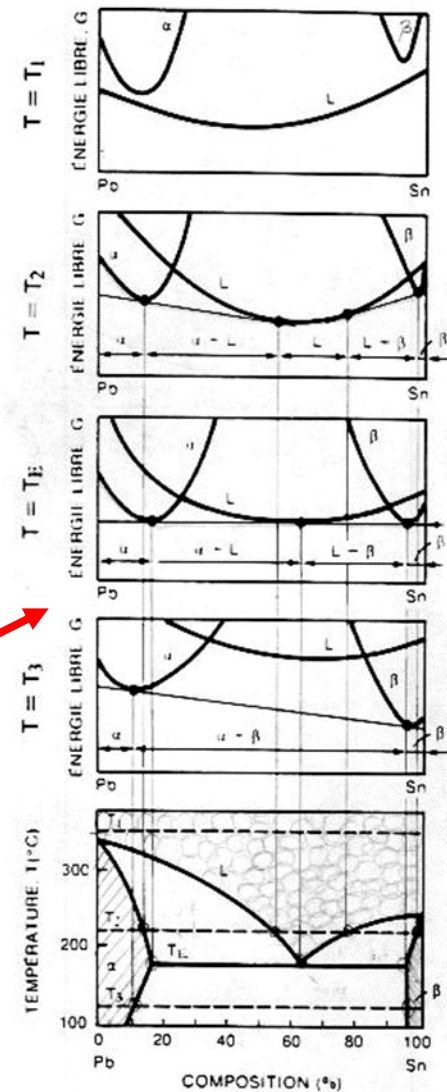
Rappel : les alliages



Solubilité totale

Lacune de solubilité

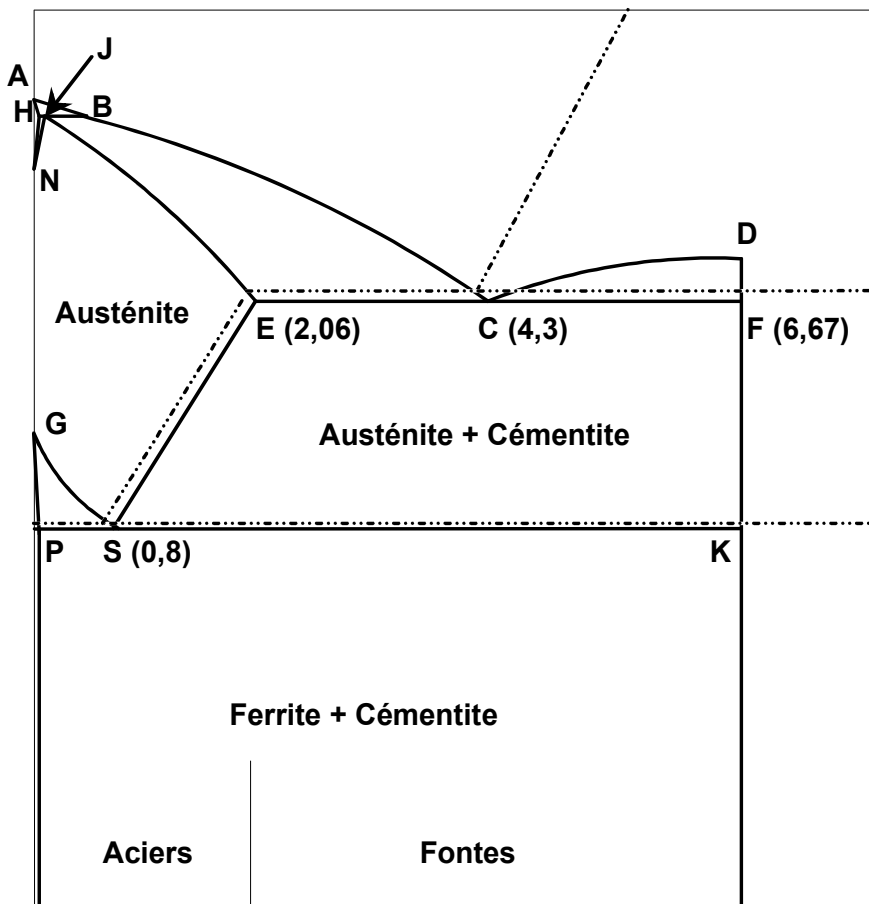
- Diagrammes de phases:
- décrivent un état d'équilibre
 - refroidissement lent



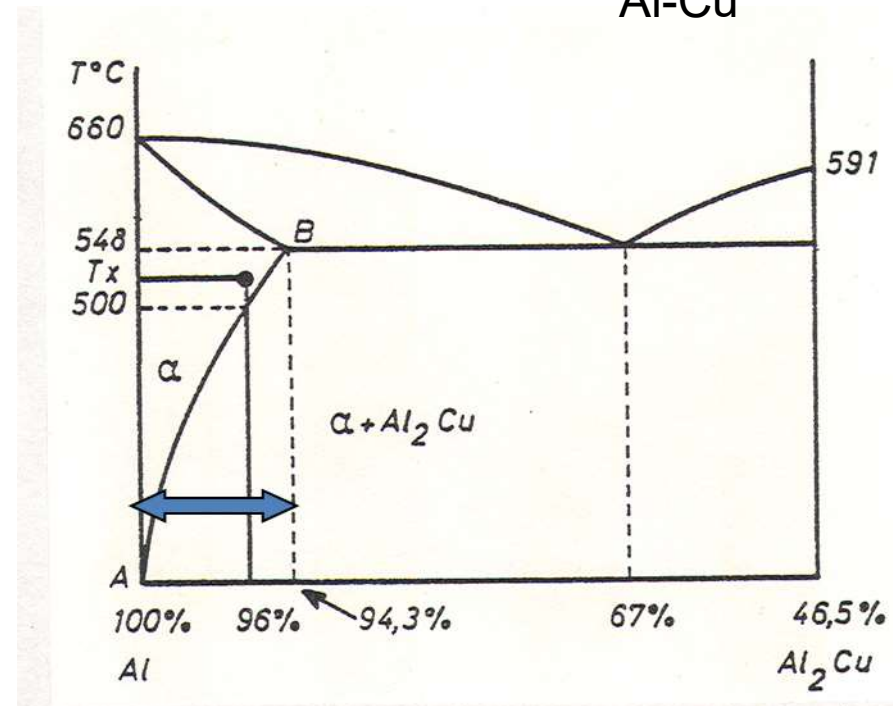
Rappel : les alliages

La structure à l'équilibre des alliages est décrite par les diagrammes de phases:

Fe-C



Al-Cu



Transformations à l'état solide **hors équilibre**

- Refroidissements rapides
- L'état du système ne peut plus être décrit par les diagrammes de phase
- Passage d'une lacune de solubilité (trempe des duralumins)
- Passage d'une transformation allotropique (trempe des aciers)

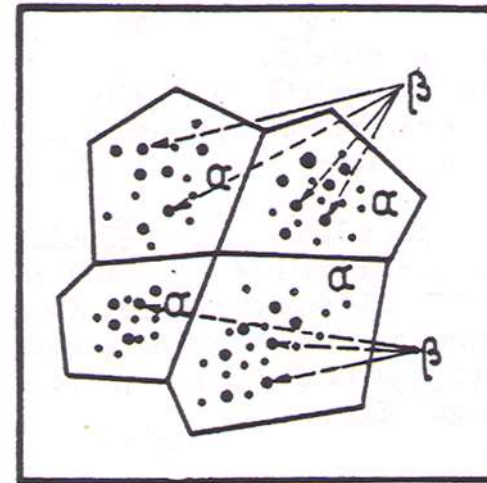
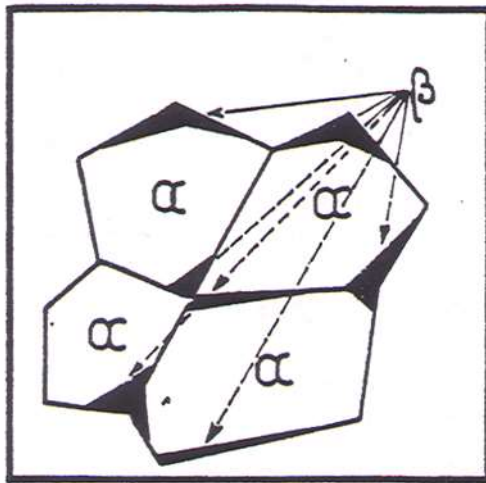
Trempe des duralumins (Al-Cu)

- Augmentation de la vitesse de refroidissement
 1. A des vitesses de refroidissement "intermédiaires", réduction de la taille des précipités

Refroidissement lent



Refroidissement rapide



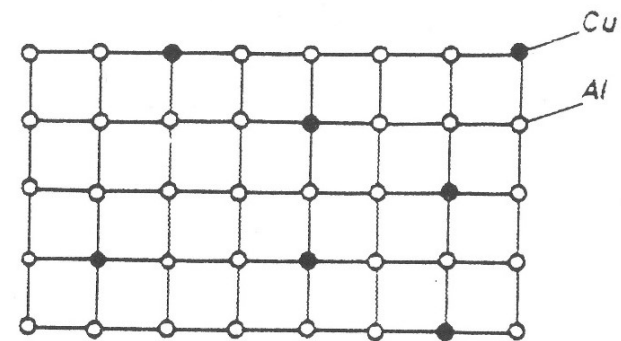
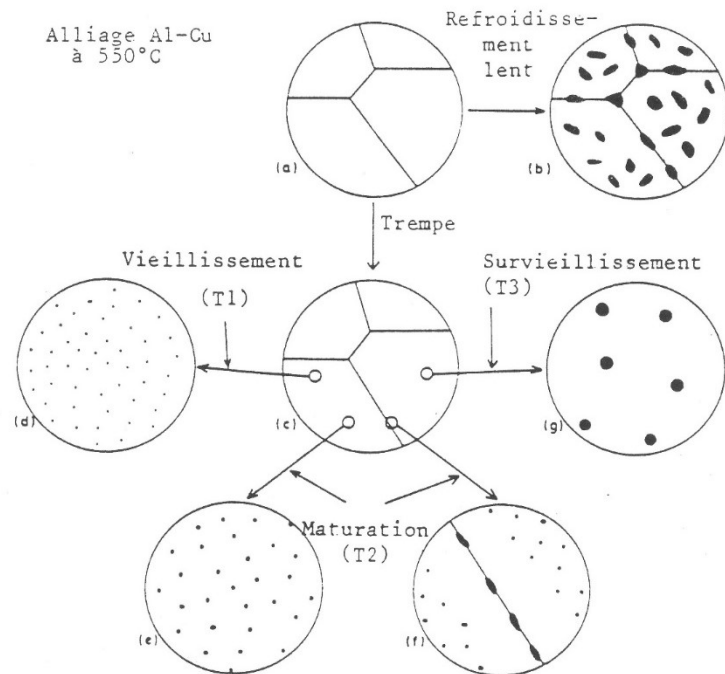
Relation de
Hornbogen:

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

Effet durcissant ↑↑

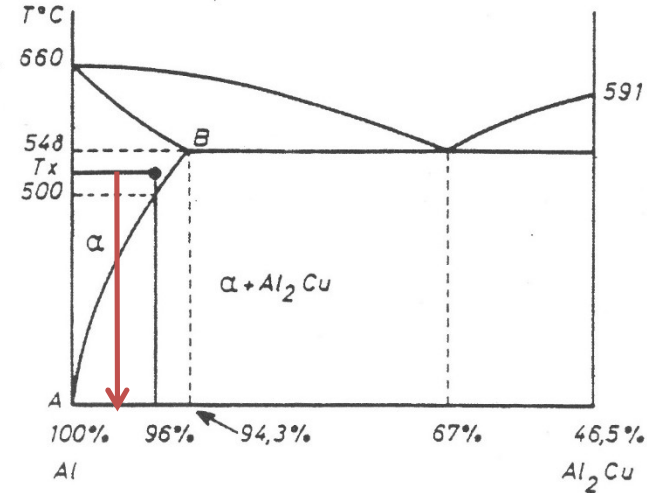
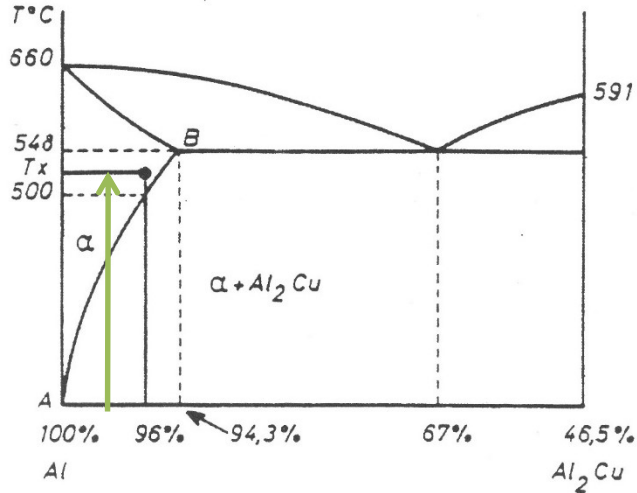
Trempe des duralumins

- Augmentation de la vitesse de refroidissement
 1. A des vitesses de refroidissement "intermédiaires", réduction de la taille des précipités
 2. A très hautes vitesses ("trempe"), pas de précipités mais on garde une solution sursaturée



Trempe des duralumins

- Mise en solution
- Trempe (refroidissement vif $\rightarrow$ solution sursaturée)
- Vieillissement $\rightarrow$ précipitation contrôlée



Evolution des duralumins après trempe

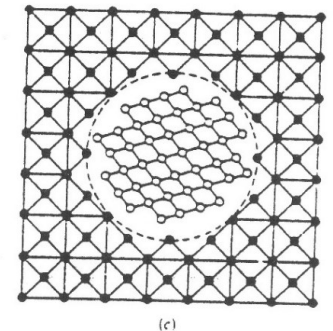
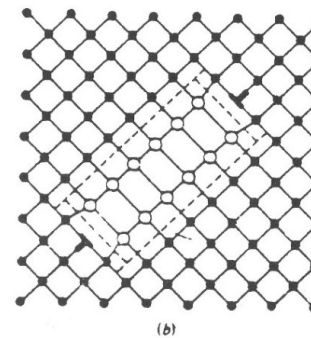
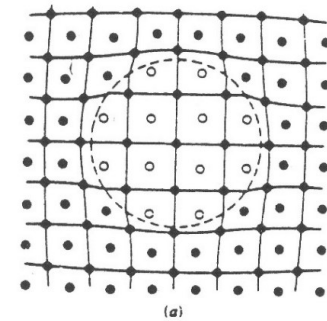
- Vieillissement : Précipitation et retour à l'équilibre en 3 étapes

1. Formation de zones enrichies en soluté (Guinier-Preston) (a)

2. Formation de précipités semi-cohérents (b)

⇒ Durcissement plus efficace

3. Formation des précipités incohérents (c)



Evolution des duralumins après trempe

- Cinétique du retour à l'équilibre

La transformation s'opère en 2 étapes

1. Germination
2. Croissance

La cinétique globale est la résultante des cinétiques de chacune des 2 étapes

Germination → Thermodynamique de l'interface

Cas d'une phase en croissance

Prendre en compte l'énergie de surface permet de mieux décrire la croissance d'une nouvelle phase au sein d'une solution.

L'expression de la variation d'énergie libre lors de la formation d'une phase est donnée par

$$\Delta G = V\Delta G_V + A\Delta G_S$$

Où ΔG_V est la variation d'enthalpie libre volumique (J/mole.m³),

V est le volume de la phase en formation,

A est l'aire de contact entre la phase en germination et le milieu qui l'entoure

ΔG_S est la variation d'enthalpie libre surfacique (J/mole.m²)

Germination →

Thermodynamique de l'interface

Cas d'une phase en croissance

En supposant que la nouvelle phase prend une forme sphérique,

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \Delta G_S$$

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \Delta G_S < 0 \quad (\text{condition de spontanéité})$$

$$\frac{r}{3}(\Delta H_V - T\Delta S_V) + \Delta G_S < 0$$

avec $\Delta H_V = T_f \Delta S_V$ où T_f est la température d'équilibre (volumique)

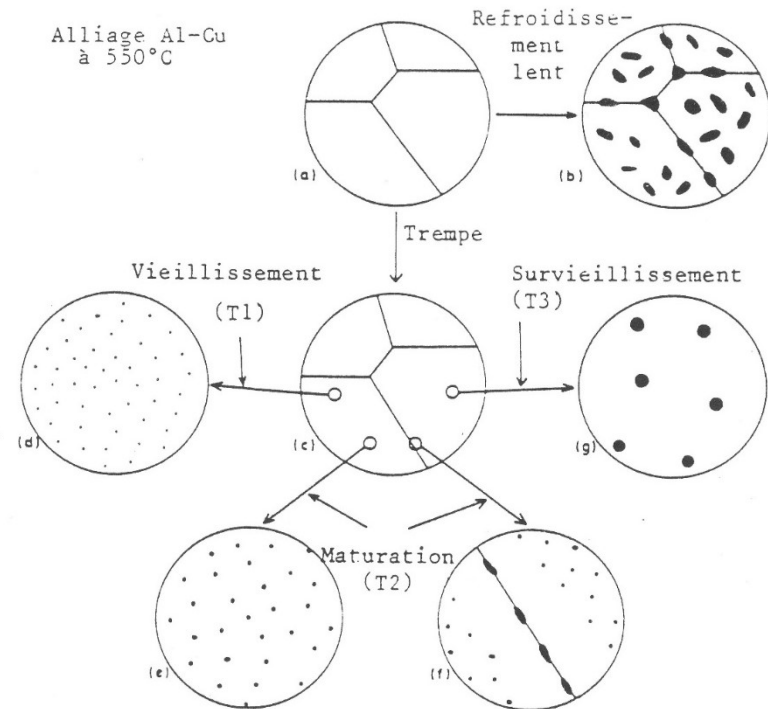
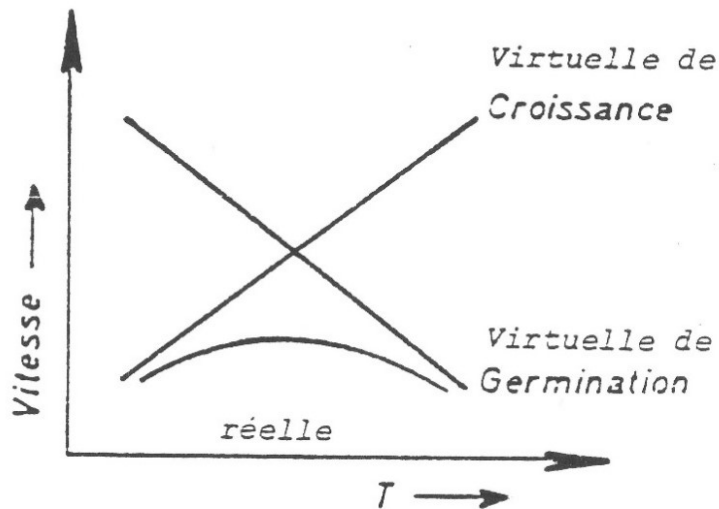
$$\rightarrow \Delta S_V = \frac{\Delta H_V}{T_f} = \frac{L}{T_f} \quad \text{où } L \text{ est la chaleur latente de transformation (cristallisation, réticulation, ...) (en J/mole)}$$

$$\rightarrow \frac{r}{3}L \left(\frac{T_f - T}{T_f} \right) + \Delta G_S < 0 \quad \longrightarrow \quad \boxed{r > \frac{3\Delta G_S}{L} \frac{T_f}{T - T_f}} \quad \text{Taille critique des germes}$$

⇒ La germination est favorisée par un certain "sur-refroidissement" ($T \downarrow$)

Evolution des duralumins après trempe

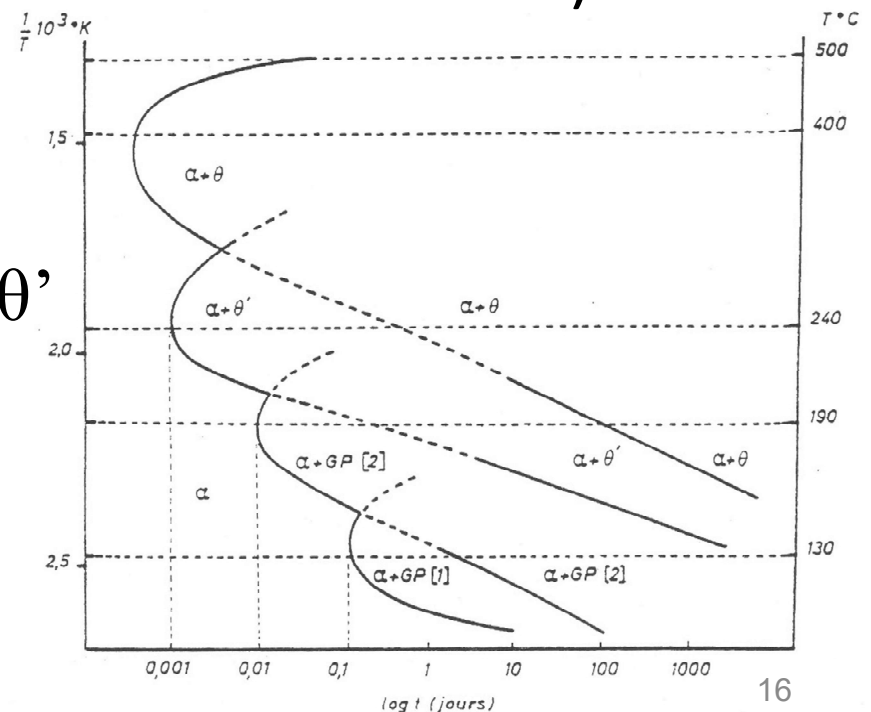
- Cinétique du retour à l'équilibre
 1. Cinétique de la germination, favorisée si $T \downarrow$
 2. Cinétique de la croissance, **favorisée par diffusion ou $T \uparrow$**
 3. Cinétique globale
→ Courbes en C



Courbes en C

- Si $T \uparrow$:
 1. Le vieillissement accélère
 2. Les étapes durcissantes sont supprimées (précipités grossiers et peu efficaces pour le durcissement)

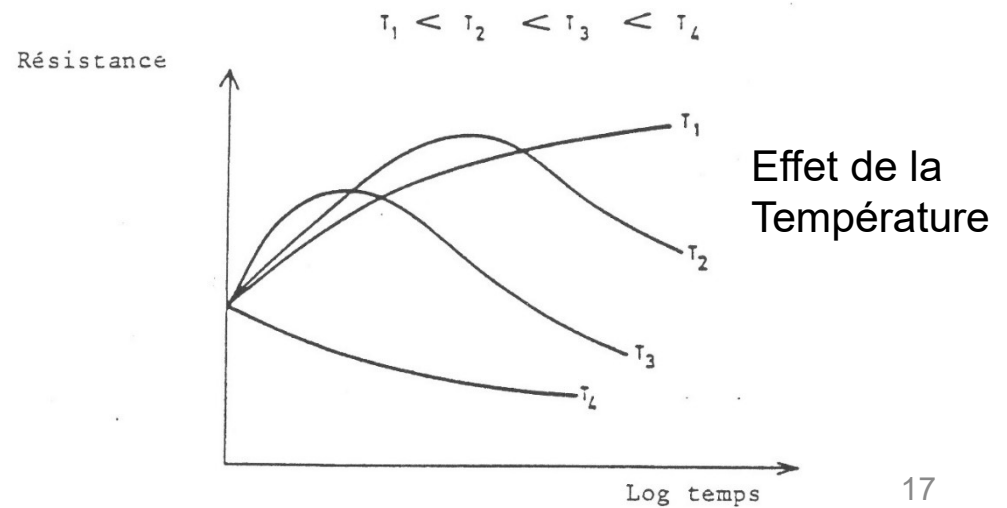
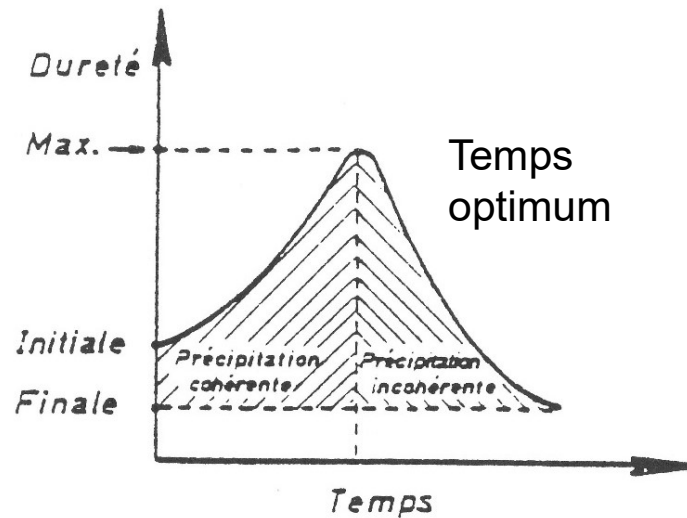
- Précipités incohérents : θ
- Précipités (semi-)cohérents: θ'
- Zones GP : GP
- Phase mère Al : α



Alliages d'aluminium - propriétés

Matériau	Re (MPa)	Rr (MPa)	Ar (%)
Al pur (99.99%)	10	50	60
Al impur (99%)	35	90	35
Duralumins	250	400	15
Ferrite impure	200	300	40
Ferrite moyenne	450	850	15
Limite aciers alliés	2400	2500	6

Résistance
fortement
améliorée !

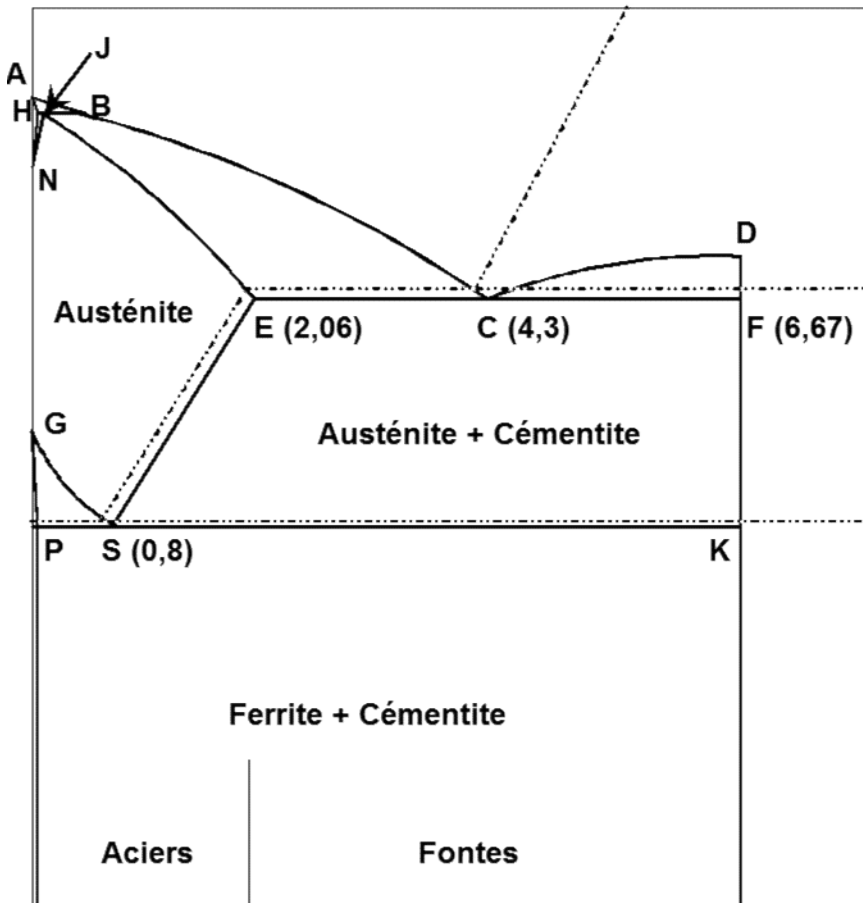


Transformations à l'état solide **hors équilibre**

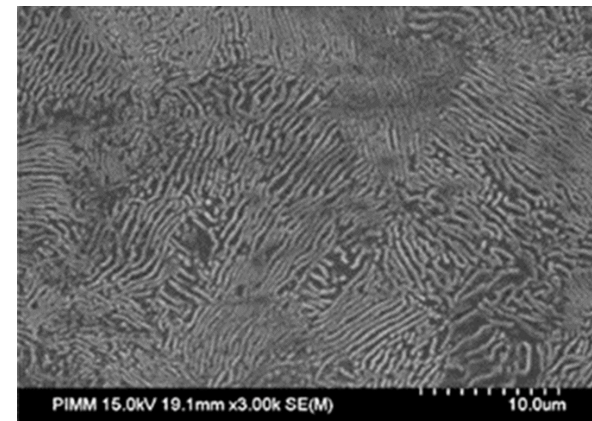
- Refroidissements rapides
- L'état du système ne peut plus être décrit par les diagrammes de phase
- Passage d'une lacune de solubilité (trempe des duralumins)
- Passage d'une transformation allotropique (trempe des aciers)

T.T. isotherme des aciers

- Cas de l'acier eutectoïde (0,8 %C), refroidissement à partir de l'austénite



Si refroidissement lent:

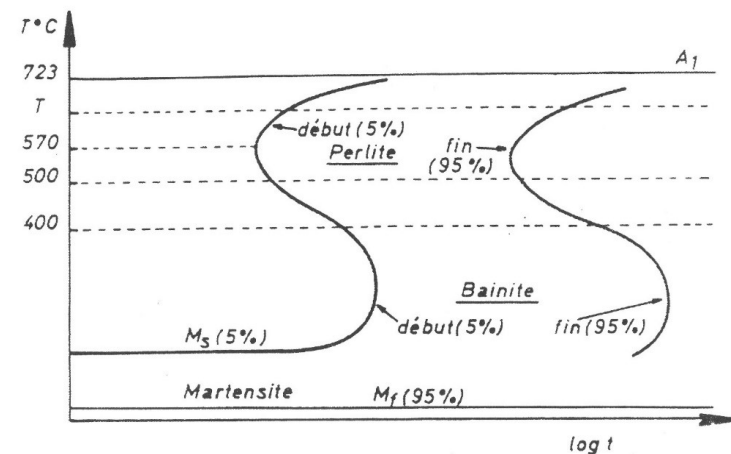
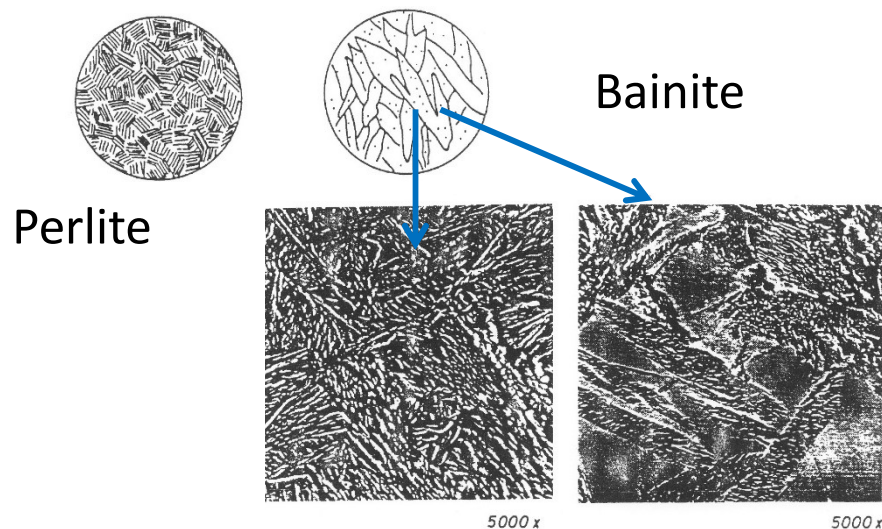


Perlite = agrégat lamellaire très fin de ferrite ($\text{Fe } \alpha$) et de cémentite (Fe_3C)

T.T. isotherme des aciers

- Cas de l'acier eutectoïde, refroidissement à partir de l'austénite suivi d'un maintien isotherme (T constant)
 1. T entre 700 et 550 °C, formation de perlite de plus en plus fine. *Germination (cémentite!) et croissance.*
 2. Entre 500 et 250 °C, formation de ferrite cellulaire, **aciculaire** puis précipitation de cémentite. *Germination et croissance.*

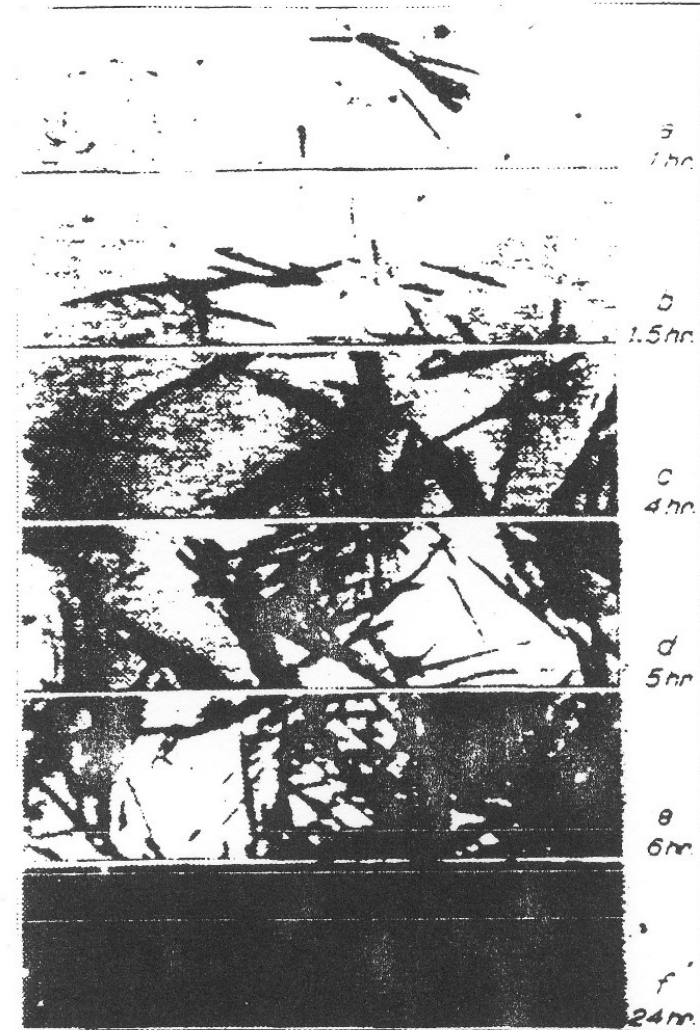
Formation de **bainite** : Microstructure très résistante sans perte de ductilité, agrégat de ferrite + carbures avec morphologie aciculaire



T.T. isotherme des aciers

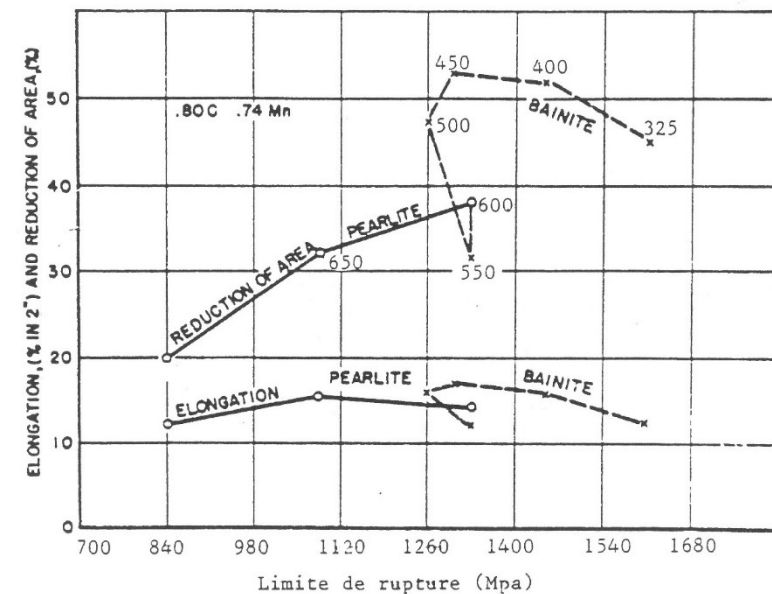
Formation progressive de bainite au cours d'un maintien isotherme à 250°C
→ Morphologie aciculaire

t ↑



Propriétés de la bainite

Matériau	Re (MPa)	Rr (MPa)	Ar (%)	HB
Ferrite pure	100	200	50	75
Ferrite impure	200	300	40	80
Cémentite				550
Perlite grossière	350	625	20	185
Perlite moyenne	450	850	15	205
Perlite fine	550	1075	10	225
Bainite supérieure	900	1350	10	
Bainite inférieure	1300	1600	10	



Carbures forment des films entre les aiguilles de ferrite

Carbures dispersés à l'intérieur des aiguilles de ferrite

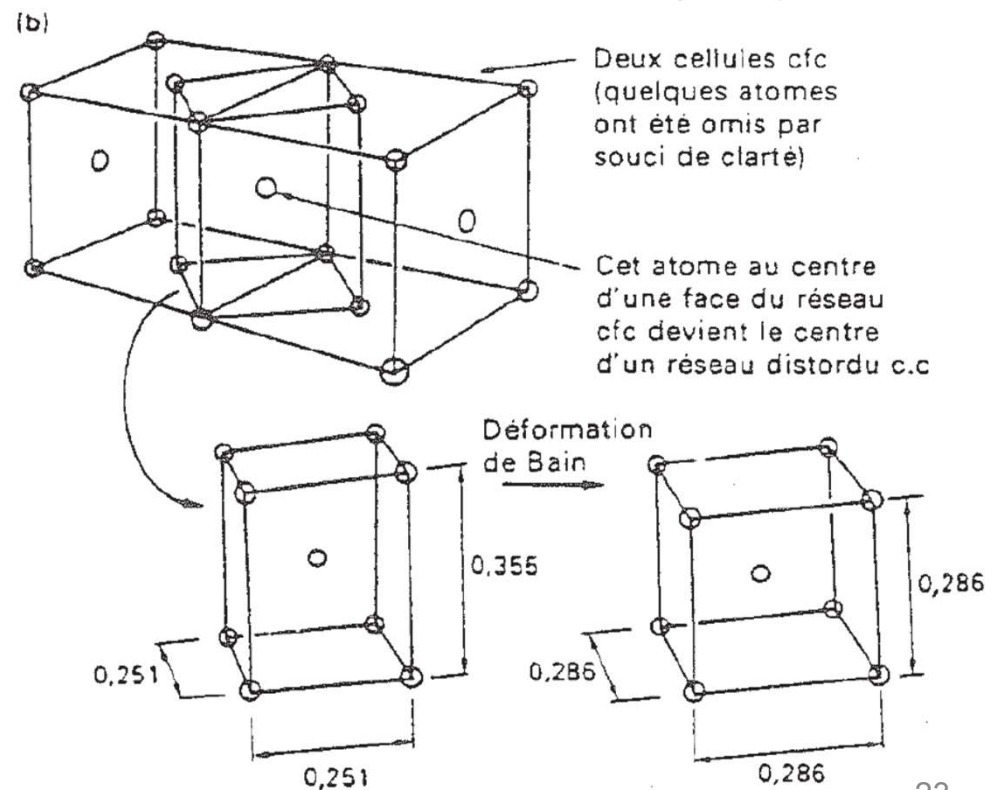
T.T. isotherme des aciers eutectoïdes

3. T_{maintien} en dessous de 250 °C : Transformation **displacive**

- Mouvement coordonné des atomes
- Insertion forcée de carbone et distorsion du réseau (cubique:=quadratique)

(// solution sursaturée de C dans la ferrite)

⇒ Formation de **martensite**



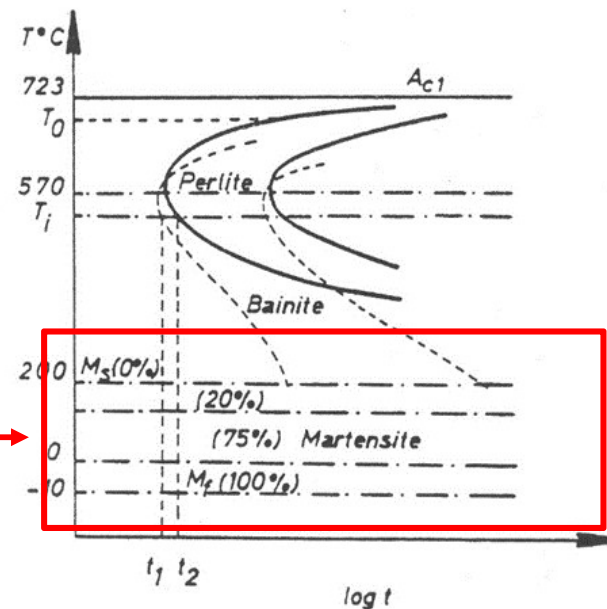
T.T. isotherme des aciers eutectoïdes

3. T_{maintien} en dessous de 250 °C : Transformation **displacive**

→ **Transformation athermale:**

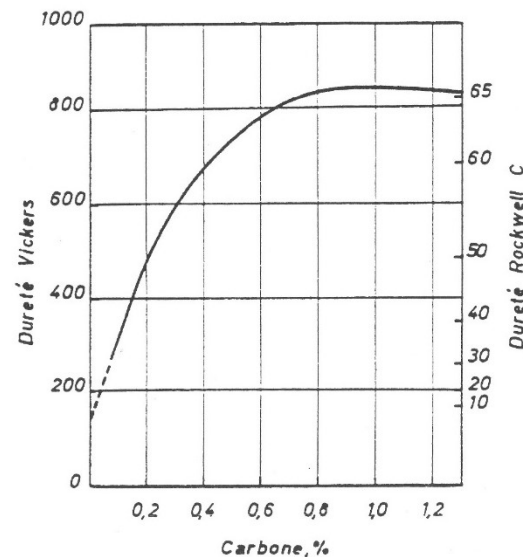
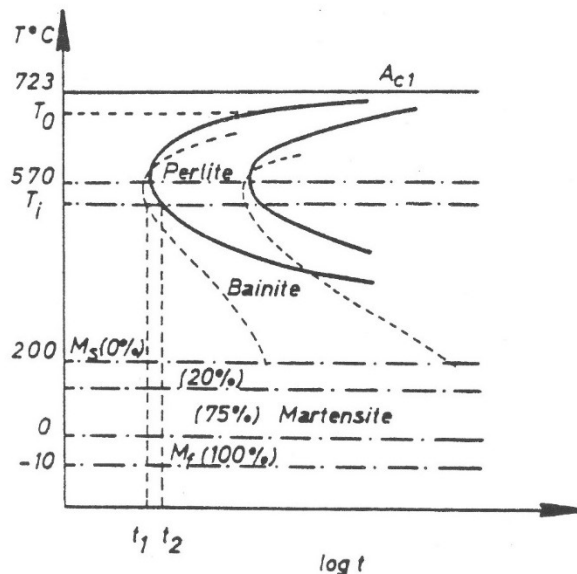
- Transformation instantanée dès que $T < M_s$ (Martensite start)
- Le taux de transformation ne dépend pas du temps, mais seulement de la température.
- La transformation continue seulement si $T \downarrow$
- Fin de transformation à $T = M_f$ (Martensite finish)

Avancement de la
réaction décrit par des
droites horizontales

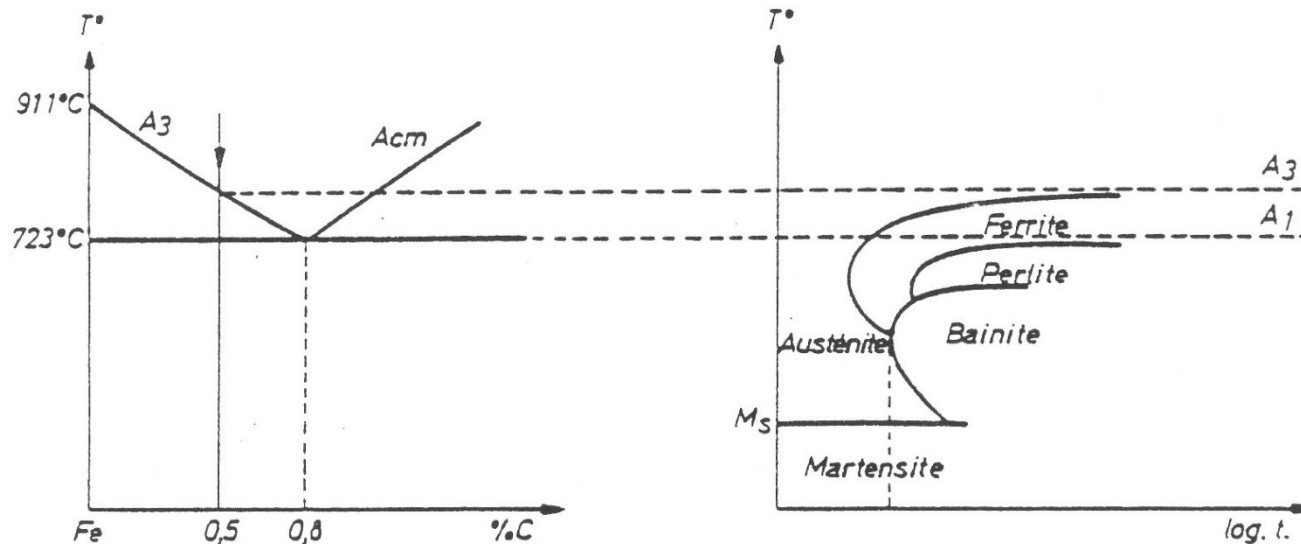


T.T. isotherme des aciers eutectoïdes

3. T_{maintien} en dessous de 250 °C : Transformation **displacive**
- Instantanée (avancement dépend seulement de T)
 - Insertion forcée de carbone et distorsion du réseau (cubique:=quadratique)
 - Aiguille avec forte concentration de dislocations et de joints de grains
 - Formation de martensite (très dure et très cassante)

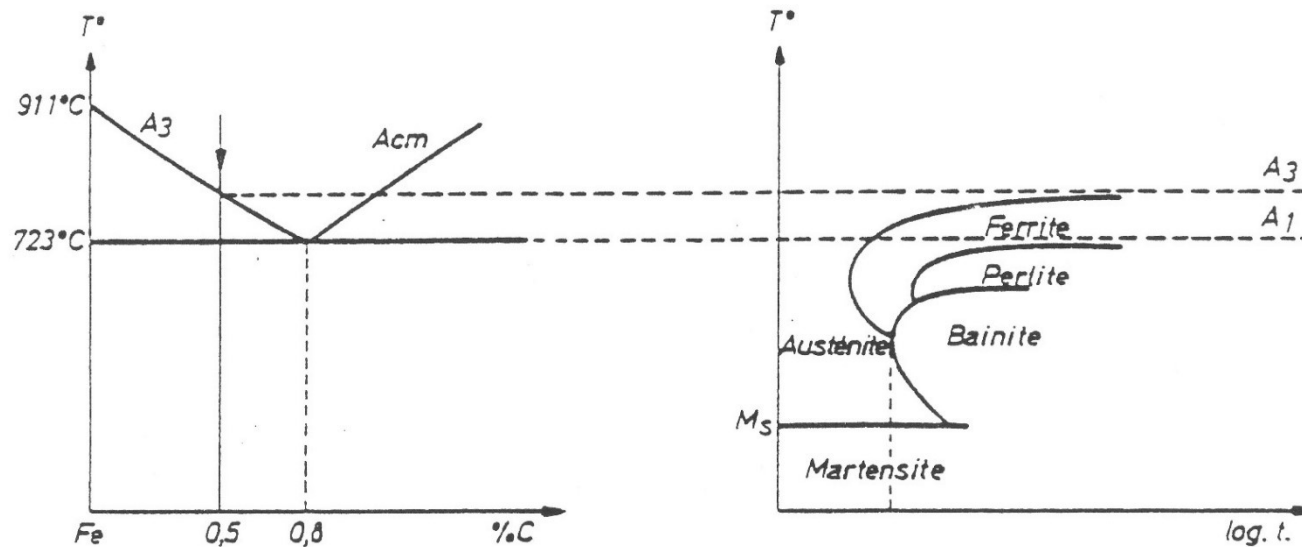


T.T. d'aciers **hypoeutectoïdes** (3 cas)



1. Pour T élevées, formation de **ferrite** proeutectoïde, puis de perlite
2. Pour T moyennes, formation de bainite (moins riche en cémentite que la bainite eutectoïde)
3. Pour T basses, formation de martensite moins riche en carbone ($[\%C] < 0.8\%$)

T.T. d'aciers hypoeutectoïdes (3 cas)

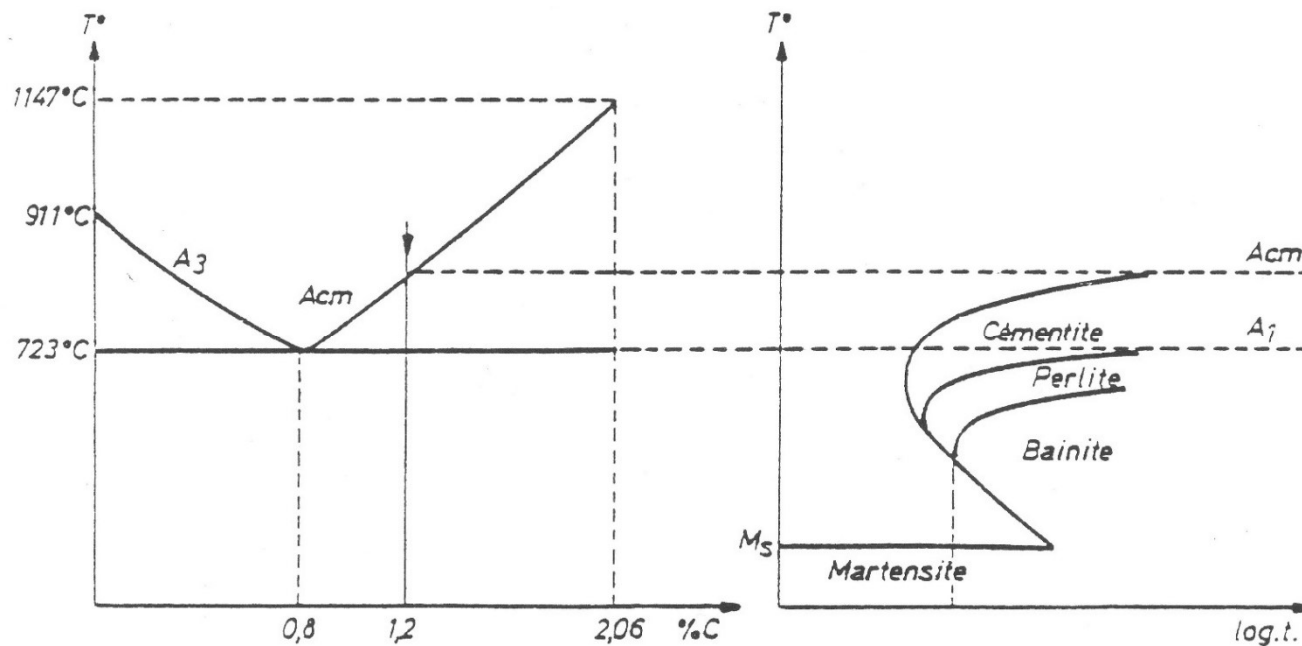


Austénite moins riche en C $\rightarrow$ moins stable :

Recul des courbes en C vers la gauche

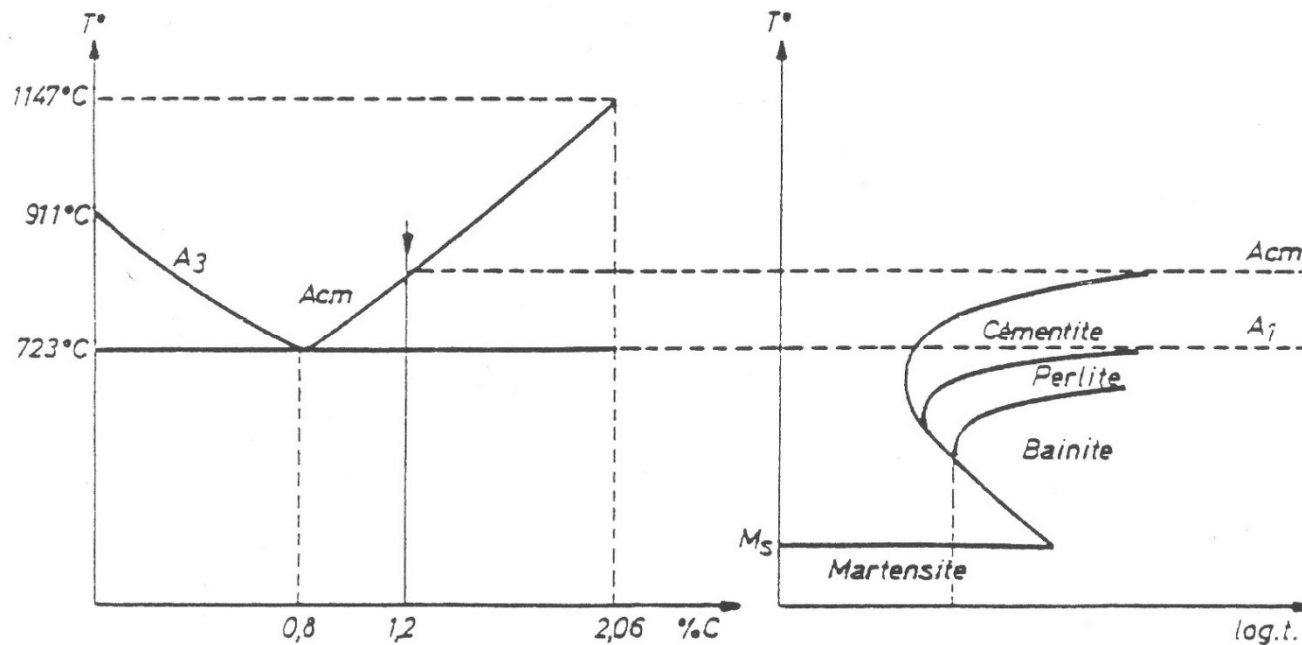
Montée de M_s et M_f ($M_s = 500 - 361[\%C]$)

T.T. d'aciers hypereutectoïdes (3 cas)



1. Pour T élevées, formation de **cémentite** proeutectoïde, puis de perlite
2. Pour T moyennes, formation de bainite (plus riche en cémentite que la bainite eutectoïde)
3. Pour T basses, formation de martensite plus riche en carbone ([%C]>0.8%)

T.T. d'aciers hypereutectoïdes (3 cas)



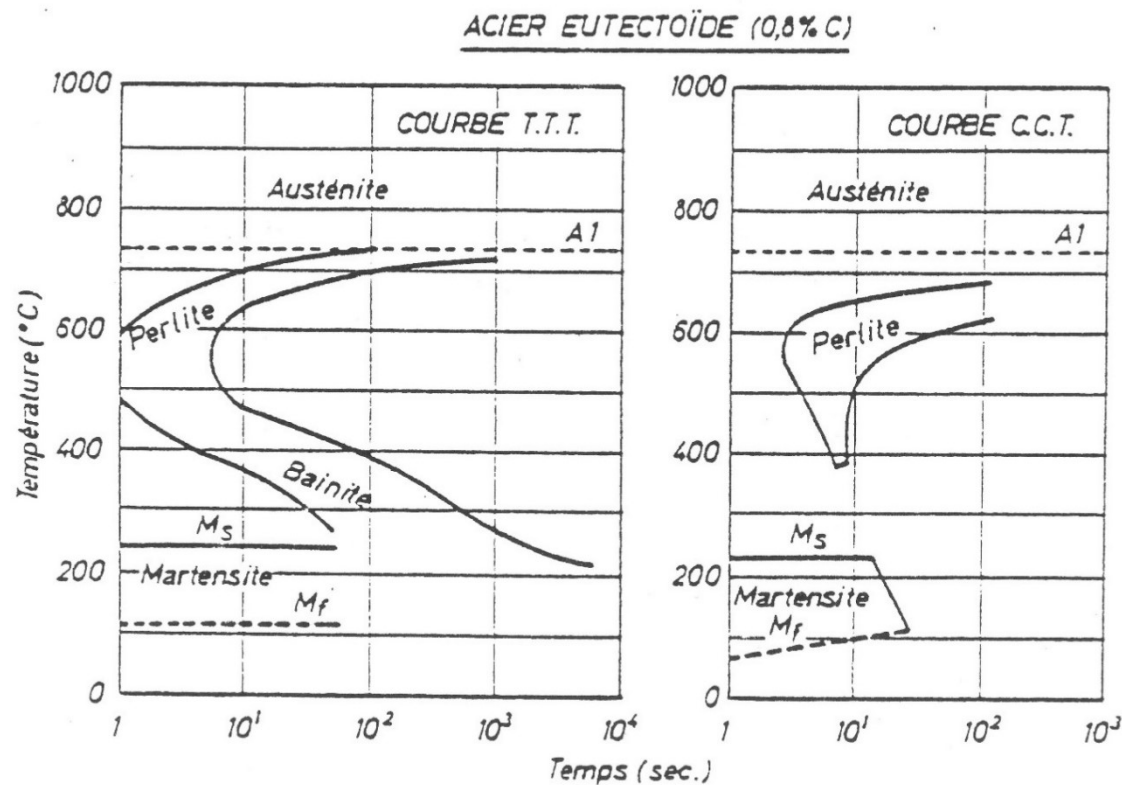
Austénite plus riche en C → plus stable :

Recul des courbes en C vers la droite

Descente de M_s et M_f ($M_s = 500 - 361[\%C]$)

Trempe (anisotherme) des aciers

- Courbes CCT au lieu de TTT pour un refroidissement continu:
La période d'incubation varie fortement selon qu'on effectue un traitement à T constante ou suivant un autre chemin!



Trempe (anisotherme) des aciers

- Courbes CCT au lieu de TTT
- 5 domaines suivant la **vitesse** de refroidissement : perlitique, perlito-bainitique, bainitique, bainito-martensitique, martensitique
- Trempabilité = facilité à former une structure complètement martensitique
- Vitesses critiques de trempe (inf & sup) nécessaires pour éviter les transformations diffusives (perlite, ferrite....)
Vitesse critique de trempe $\downarrow \Rightarrow$ trempabilité $\uparrow$
- Effet de %C, du % des éléments d'alliage et de la taille de grains et des défauts
- Modification de la trempabilité de l'acier

Trempe (anisootherme) des aciers

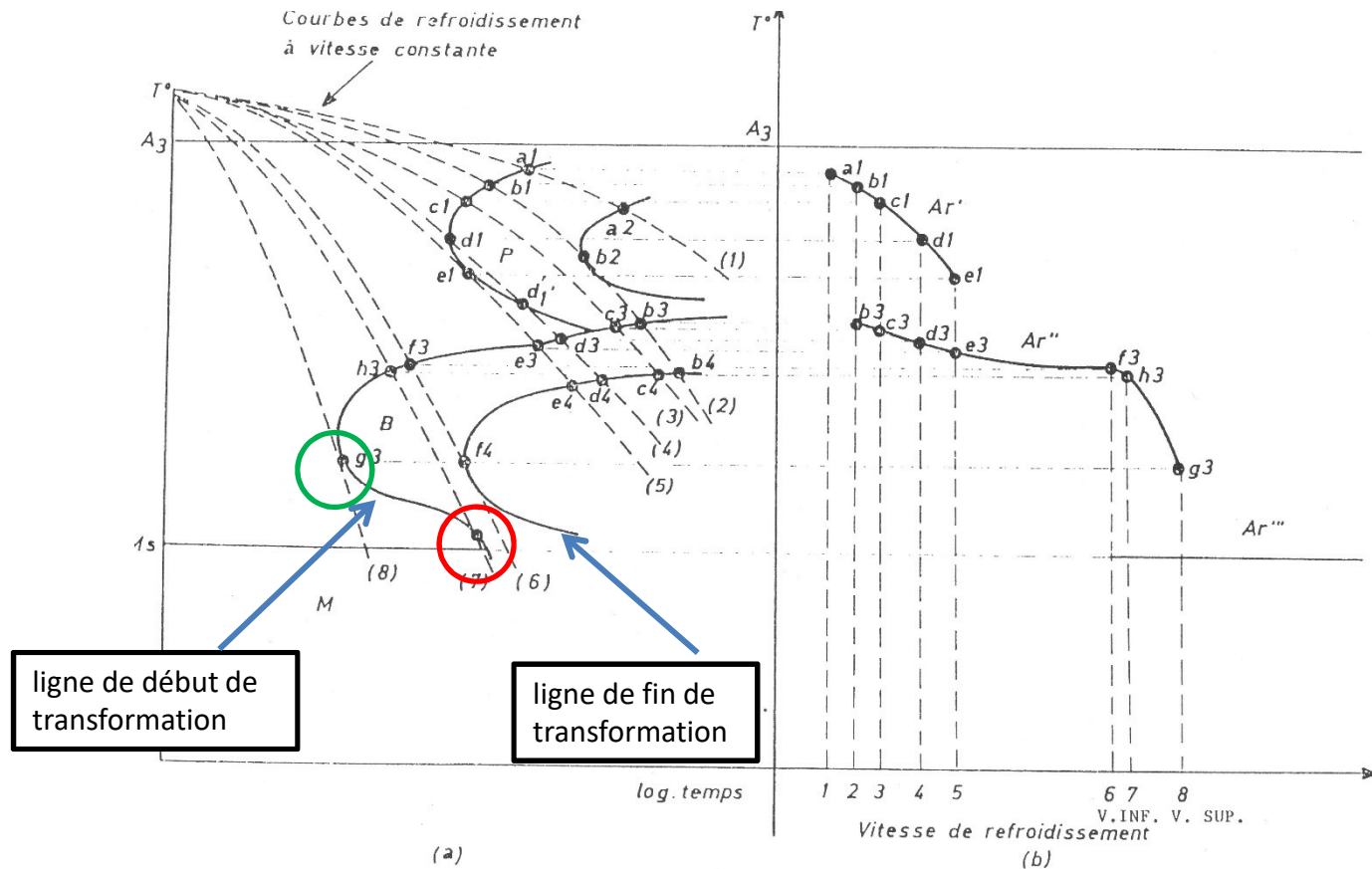


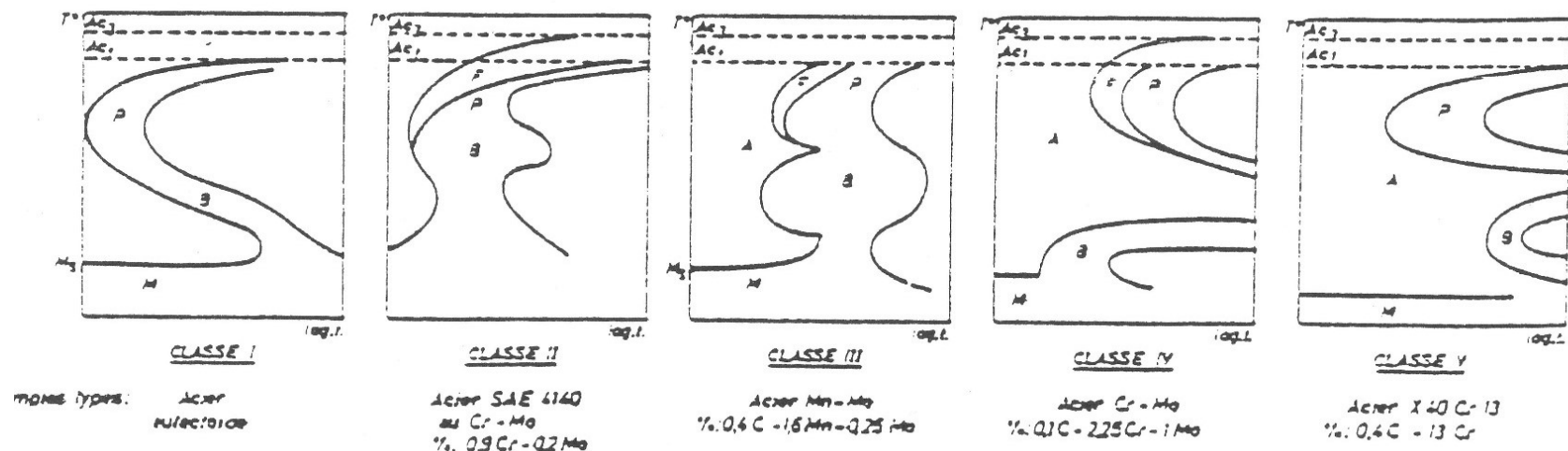
Figure VI.36- a) courbe CCT d'un acier allié

b) les températures de début de transformation perlitique, bainitique et martensitique en fonction de la vitesse de refroidissement.

Vitesses critiques de trempe (inf & sup)

T.T. isotherme d'aciers alliés

- Tous les éléments d'alliage (sauf Co) ralentissent les transformations diffusives → trempabilité ↑
- Taille de grains modifie les conditions de germination des nouvelles phases
 - Germination de la perlite/ferrite aux joints de grains
 - Germination à l'intérieur des grains pour la martensite
 → Taille de grains ↑ ⇒ trempabilité ↑



Effet de %C, du % des éléments d'alliage et des défauts