

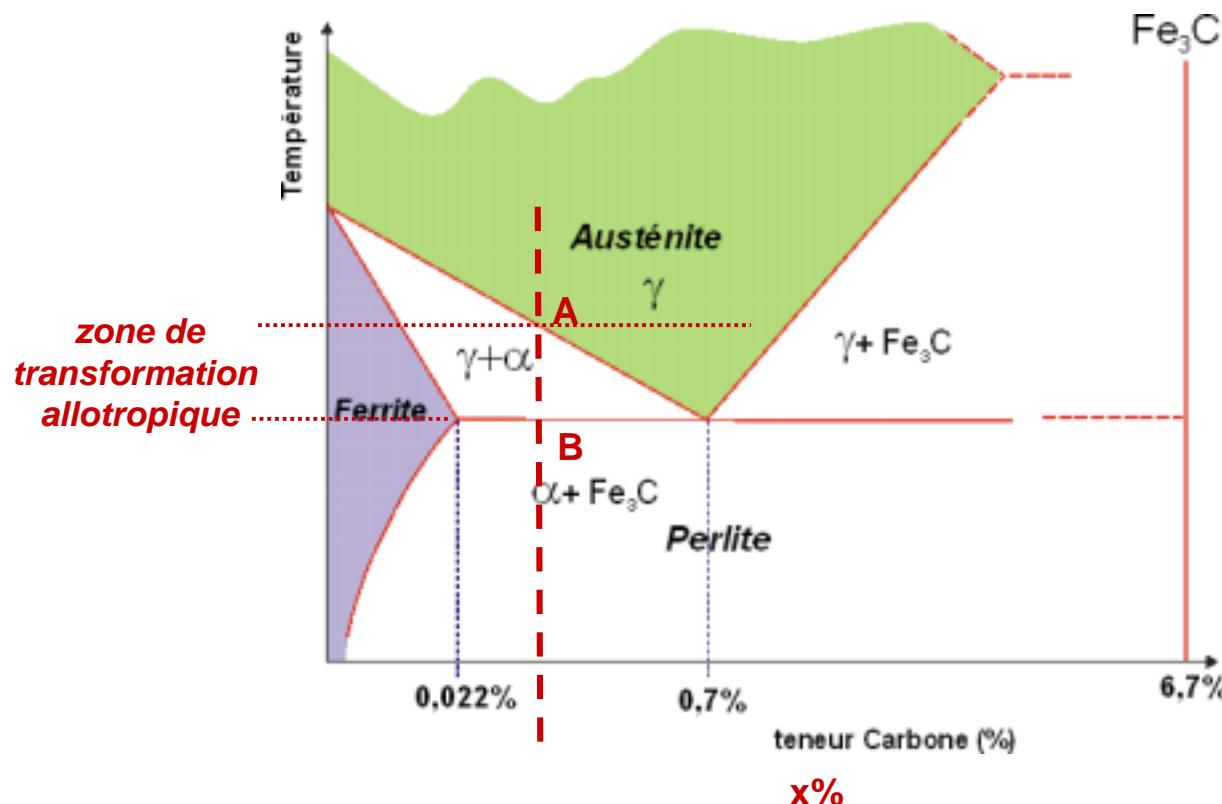
IX - Les traitements thermiques des aciers

diagrammes de phases : diagramme d'équilibre = temps infini....

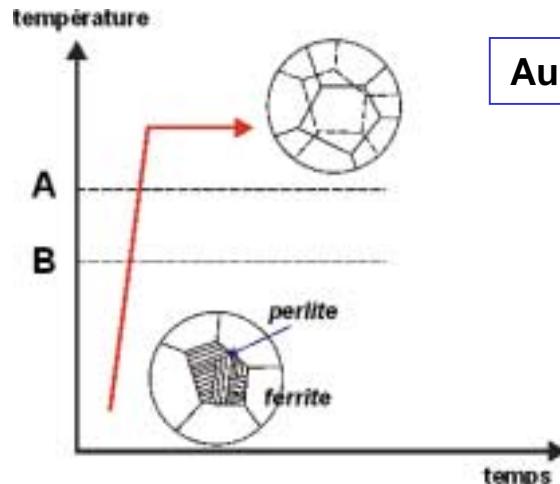
dans la réalité les vitesses de chauffage et de refroidissement jouent un rôle essentiel et peuvent modifier :

- la microstructure (transformations de phases, taille de grains, précipitation...)
- les propriétés mécaniques, dureté et fragilité...
- mais laissent la composition chimique inchangée

1) Aciers ferritiques (alliages avec transformations de phases)

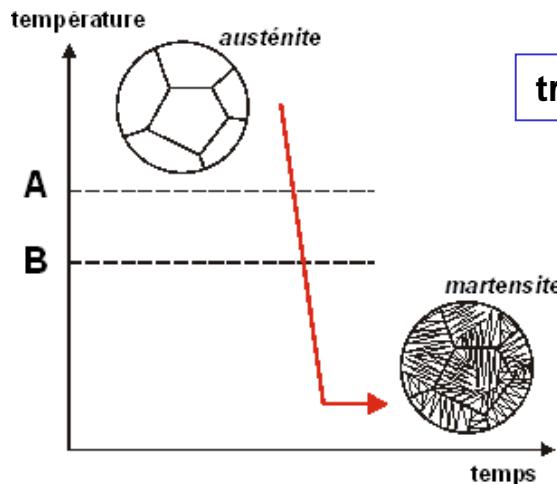


3 grandes variétés de traitement thermique :



Austénitisation

- changement de phase
- remise en solution

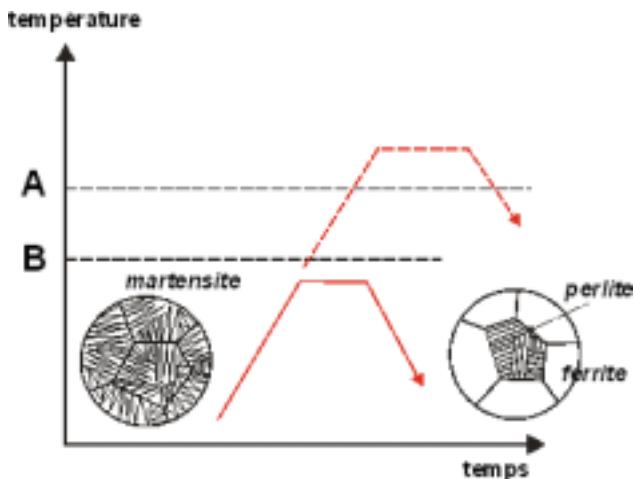


trempe

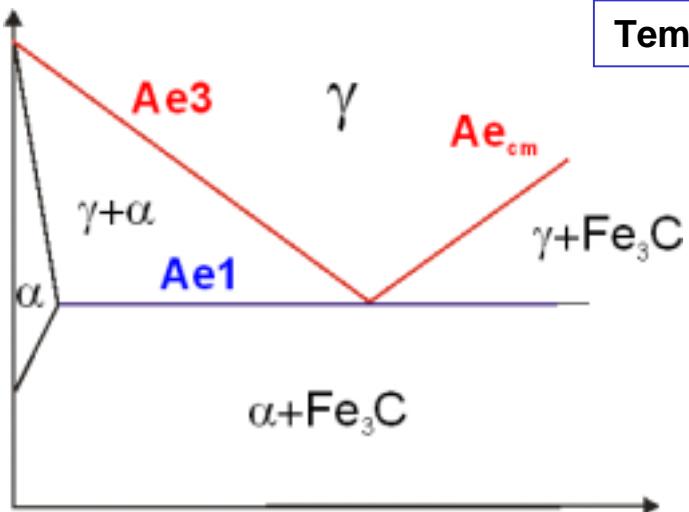
- refroidissement avec changement de phase
- durcissement
- figer la structure

revenu, recuits maintiens isothermes

- adoucissement
- adaptation de la microstructure et des propriétés mécaniques



Températures de transformation



acières hypoeutectoïdes :

Ae_3 : supérieure

Ae_1 : inférieure (transformation eutectoïde)

acières hypereutectoïdes :

Ae_{cm} : supérieure

Ae_1 : inférieure (transformation eutectoïde)

au chauffage et au refroidissement : hystéresis

acières hypoeutectoïdes :

- refroidissement :

Ar_3 : début de la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$

Ar_1 : fin de la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$

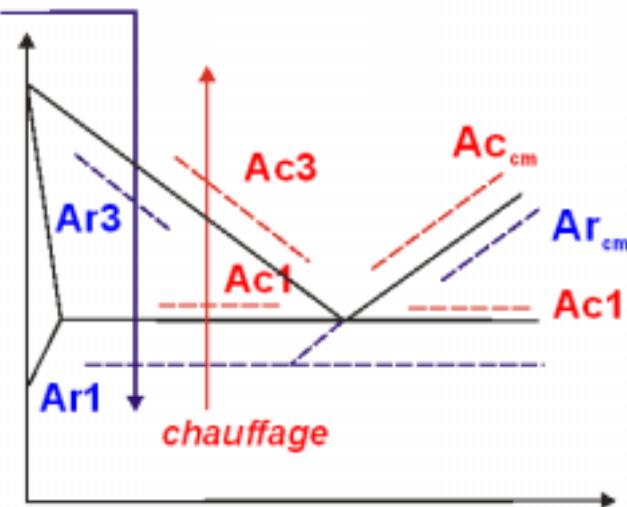
- chauffage :

Ac_3 : début de la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$

Ac_1 : fin de la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$

la teneur en éléments d'addition modifie les températures de transformation :

refroidissement



acières faiblement alliés (C<0,6%)

$$Ae1 \sim Ac1 = 723 - 10,7Mn - 16,9Ni + 29,1Si + 16,9Cr + 6,38W + 290As$$

$$Ae3 \sim Ac3 = 910 - 203\sqrt{C} - 15,2Ni + 44,7Si + 104V + 31,5Mo + 13,1W - 30Mn - 11Cr - 20Cu + 700P + 400Al + 120As + 400Ti$$

L'Austénitisation

première étape des traitements thermiques

conditions :

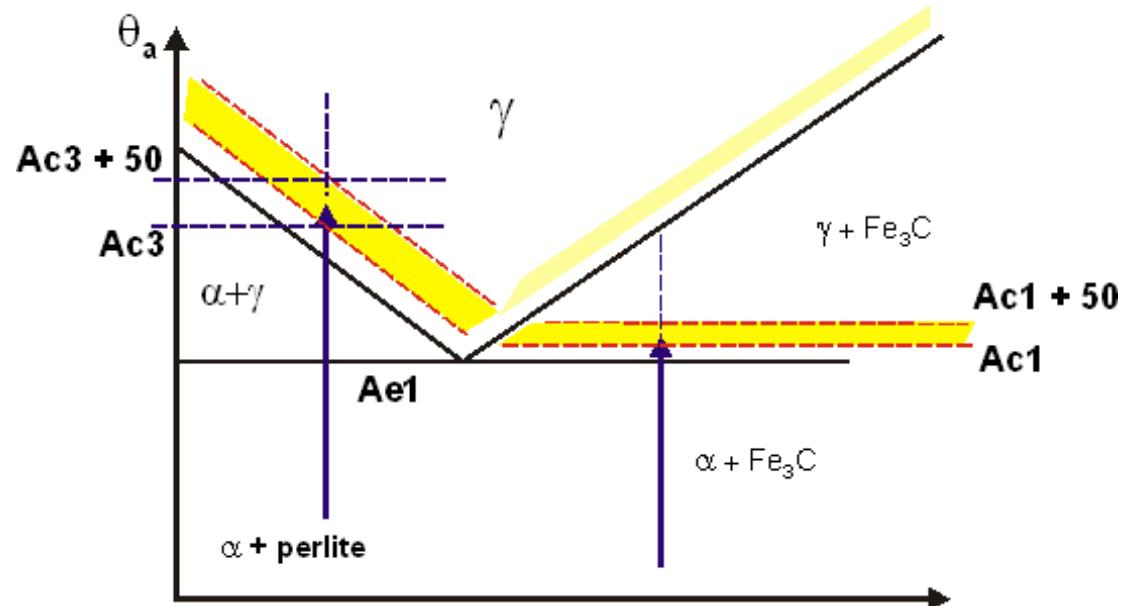
- existence d'une phase austénite stable à haute température
- existence d'une transformation austénite-ferrite

paramètres :

- la température θ_a

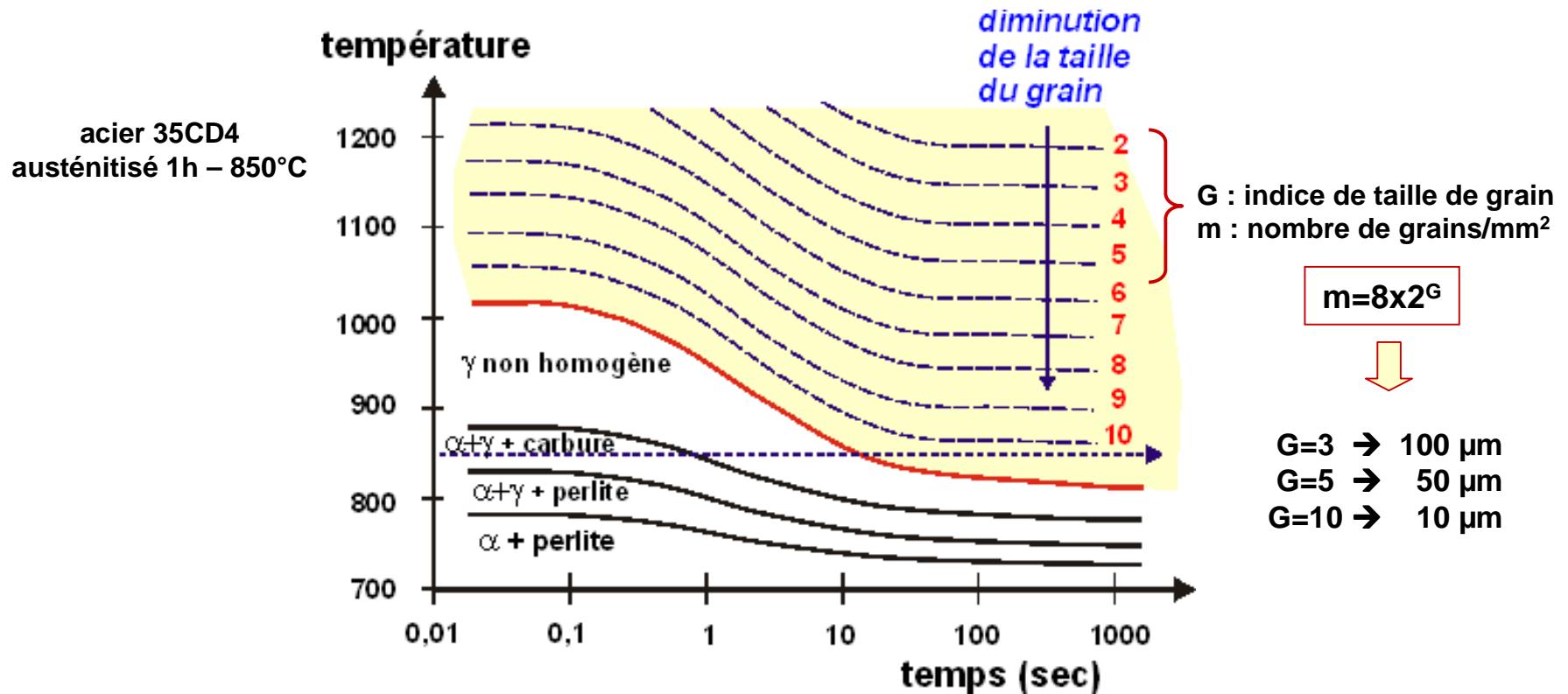
aciérs hypoeutectoïdes :
entre $Ac3$ et $Ac3 + 50^\circ C$

aciérs hypopereutectoïdes :
entre $Ac1$ et $Ac1 + 50^\circ C$



- la durée de maintien à θ_a

selon la composition et la grosseur de la pièce

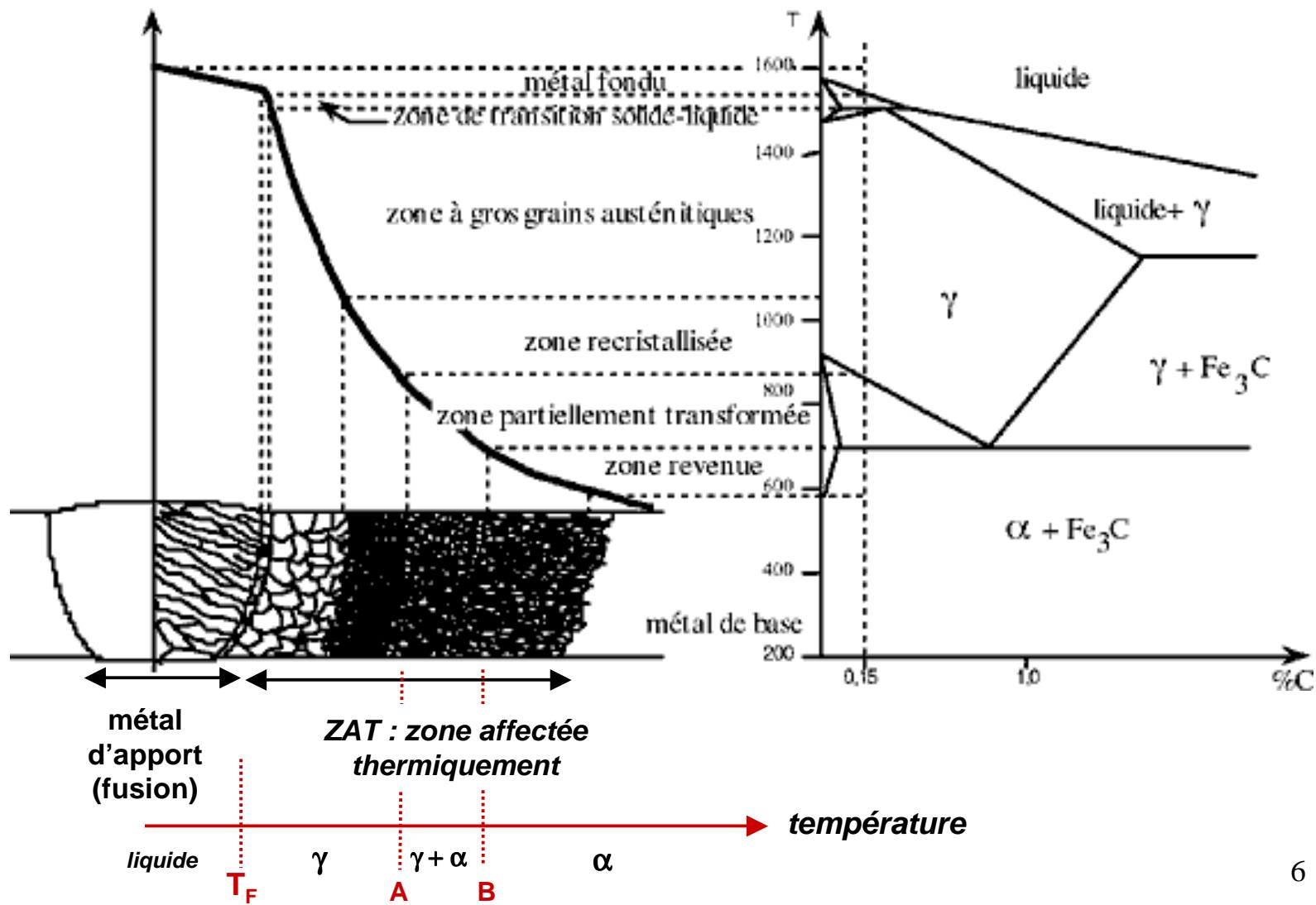


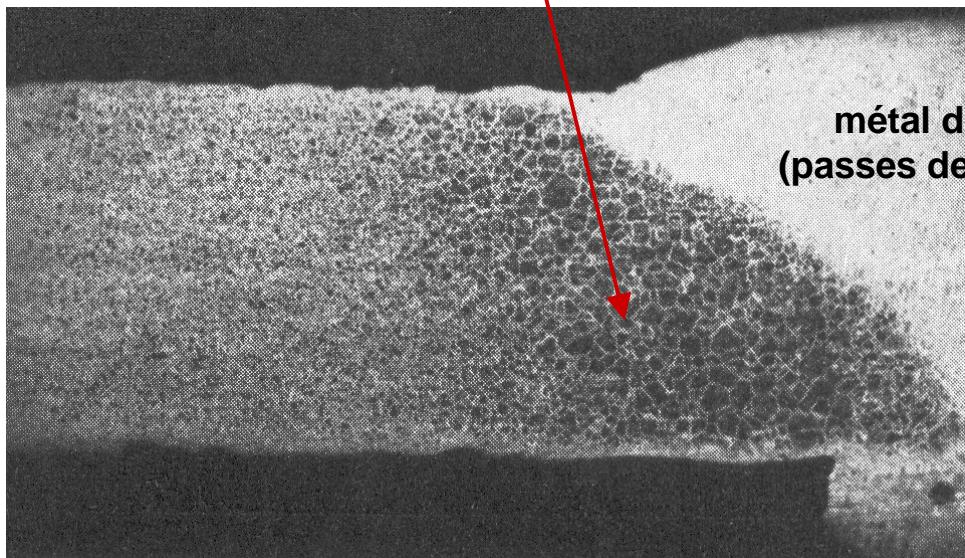
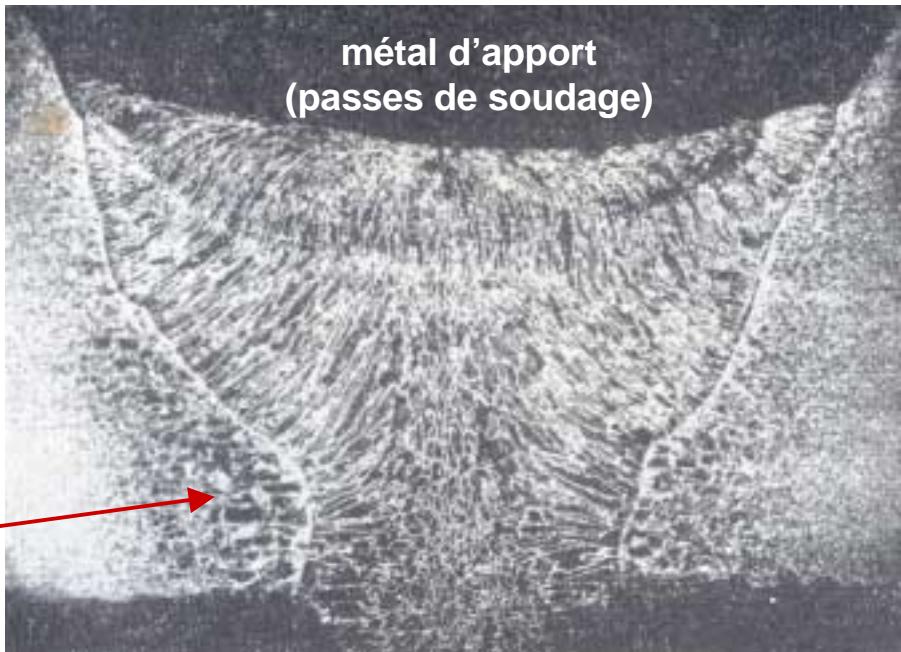
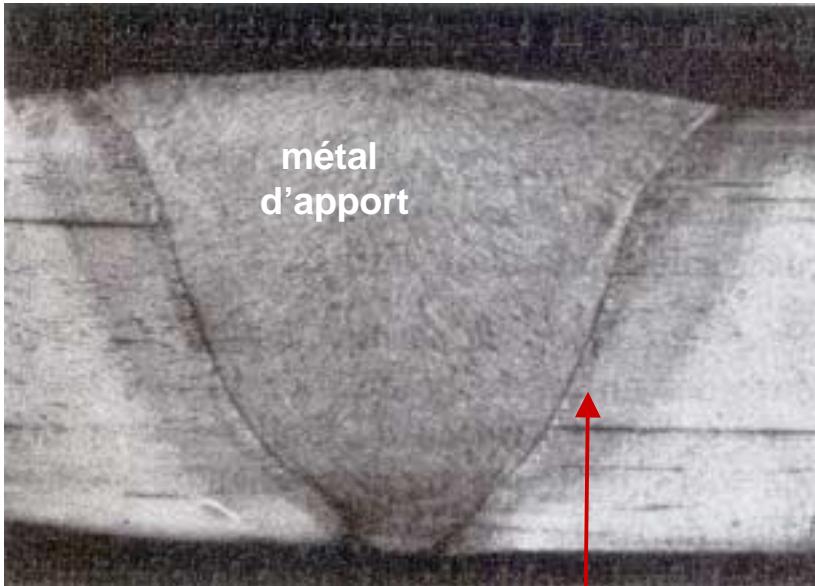
→ composition chimique locale par remise en solution (carbures...)

→ microstructure (grossissement du grains)

Remarque : l'austénitisation apparaît également lors des opérations de soudage

I'apport d'un alliage en fusion (« métal d'apport ») entraîne une élévation importante de la température du métal de base, provoquant des modifications microstructurales (« ZAT »)





quelques microstructures
de soudure

La Trempe

refroidissement plus ou moins rapide après une austénitisation

- a) austénitisation ($Ac_3 + 50^\circ C$)
- b) attendre que la transformation $\alpha \Rightarrow \gamma$ soit terminée
- c) refroidissement jusqu'à la température ambiante
 - soit directement
 - soit par palier (trempe étagée)

modes de refroidissement :

- dans un bain de sels fondus (haute température)(trempe étagée)
- dans un four éteint : refroidissement très lent ($100^\circ C/h$)
- à l'air : refroidissement lent ($100^\circ C/mn$)
- à l'eau : refroidissement rapide ($100^\circ C/s$)
- à l'azote liquide : refroidissement très rapide ($15000^\circ C/s$)
- sur cylindre métallique : hypertrempe (quelques $10^6^\circ C/S$)

Influence de la vitesse de refroidissement sur les transformations de phases

vitesse de refroidissement lente :

transformation austénite-ferrite par germination-croissance
transformation diffusive

⇒ *déplacements atomiques permettant la création de germes et leur croissance*

La vitesse de transformation dépend de 2 facteurs :

- la force motrice de la transformation qui augmente quand la température diminue

$$\Delta H \frac{T_t - T}{T_t}$$

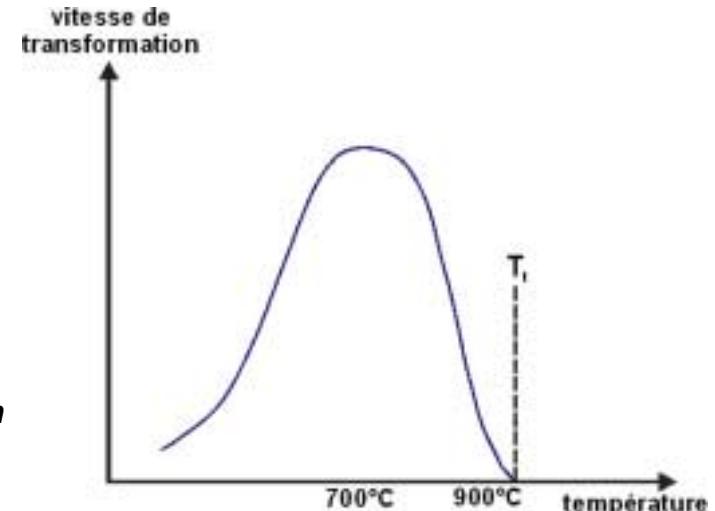
- la diffusion qui décroît avec la température

loi de Fick $J = -D \frac{dc}{dx}$

gradient de concentration

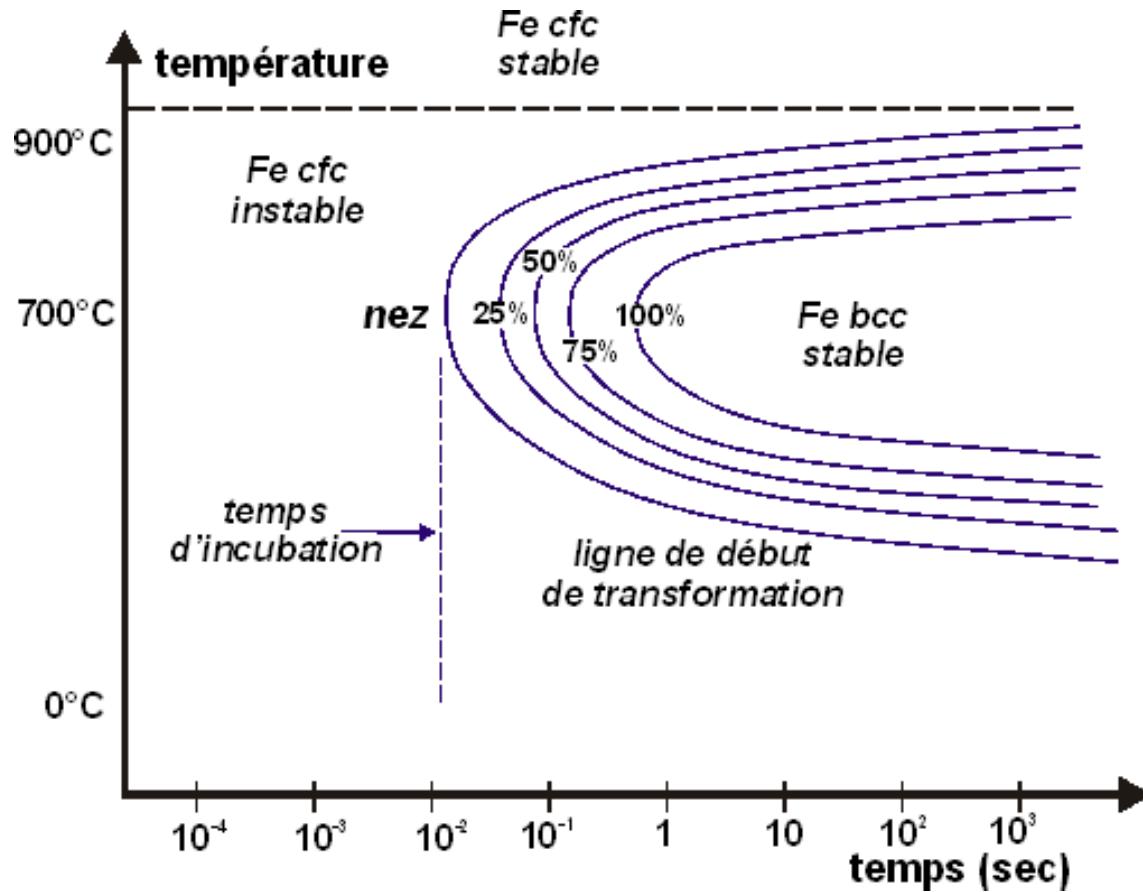
flux *coefficient de diffusion*

$$D = D_0 \exp\left[-\frac{Q}{RT}\right]$$



la vitesse de transformation passe par un maximum

le temps et le taux de transformation sont donnés pour un acier donné par les courbes TTT (température - temps- transformation)(transformations isothermes)



Un tel diagramme suppose que l'acier reste à une température élevée un temps suffisant pour que la transformation se produise

vitesse de refroidissement rapide :

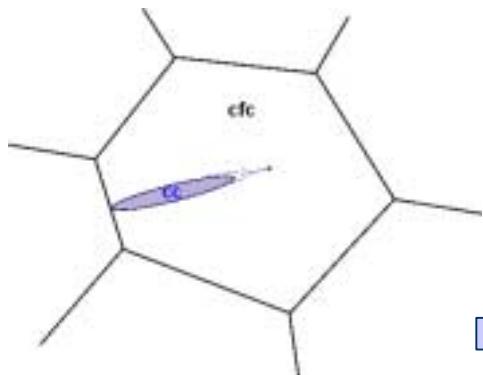
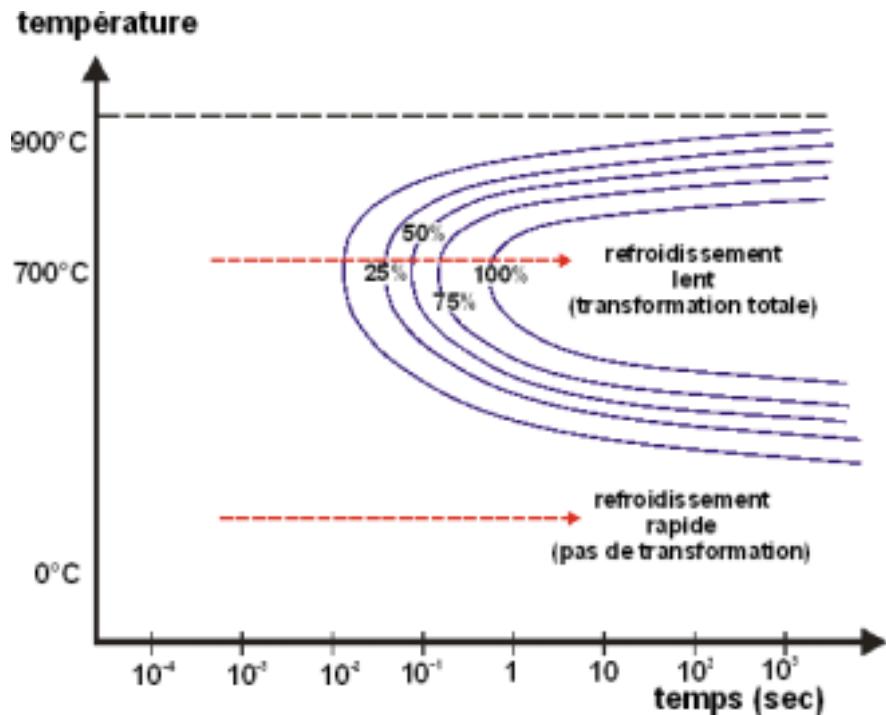
Pour qu'il y ait transformation, il faut que le refroidissement soit assez lent pour rester assez longtemps dans la zone à 700°C

si ce n'est pas le cas, il ne peut y avoir de transformation diffusive...

on a une transformation « displasive »

La force motrice de transformation devient très grande en-dessous de 550°C, mais la diffusion ne peut plus intervenir...

La transformation austénite-ferrite se fait par un mécanisme displasif, c'est à dire par une modification locale de la maille sans déplacement de matière...



Un germe de structure cc se forme dans l'austénite et progresse à la vitesse des ondes élastiques (vitesse du son dans l'acier, soit 5km/s) par cisaillement sous la forme de plaquettes lenticulaires



transformations martensitiques

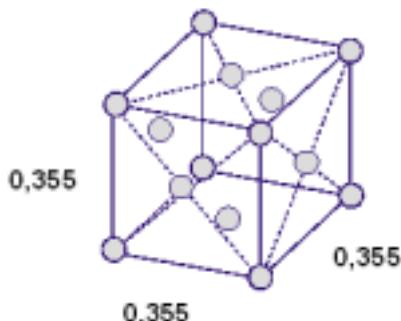
Comparaison entre une transformation diffusive et une transformation displasive

transformation diffusive	transformation displasive
<ul style="list-style-type: none">- les atomes migrent sur de grandes distances interatomiques (de 1 à 10⁸)- les atomes migrent de site en site par diffusion thermique activée- les atomes bougent au hasard, avec une légère préférence dans un sens ("méthode civile")- la vitesse de transformation dépend fortement de la température et ne peut se produire en dessous de 0,3 à 0,4 T,- le volume transformé dépend de la température et du temps- la diffusion permet des changements de composition chimique- il peut exister des relations cristallographiques entre les phases	<ul style="list-style-type: none">- les atomes migrent sur des distances de l'ordre de la distance interatomique- les atomes migrent par rupture de liaison et réarrangements locaux- les atomes bougent de manière coopérative ("méthode militaire")- la vitesse de transformation est celle des vibrations du cristal et ne dépend pas de la température (jusqu'à 4K)- le volume transformé ne dépend que de la température- la composition chimique de la phase ne change pas (pas de diffusion)- il existe toujours une relation cristallographique entre la phase mère et la martensite

réversible

alliages à mémoire de forme

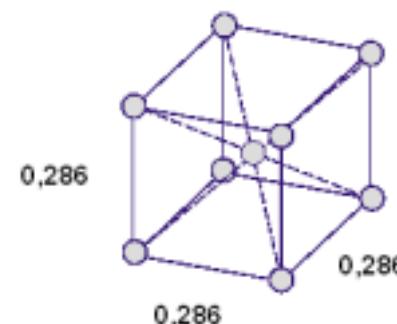
Fer cubique faces centrées



austénite

paramètre : 0,355 nm
4 atomes par maille
indice de compactage : 74%
4 sites octaédriques
8 sites tétraédriques
diamètre maxi d'un site : 0,104 nm

Fer cubique centré



ferrite

paramètre : 0,286 nm
2 atomes par maille
indice de compactage : 68%
6 sites octaédriques
12 sites tétraédriques
diamètre maxi d'un site : 0,0722 nm

diamètre d'un atome de carbone : 0,148 nm

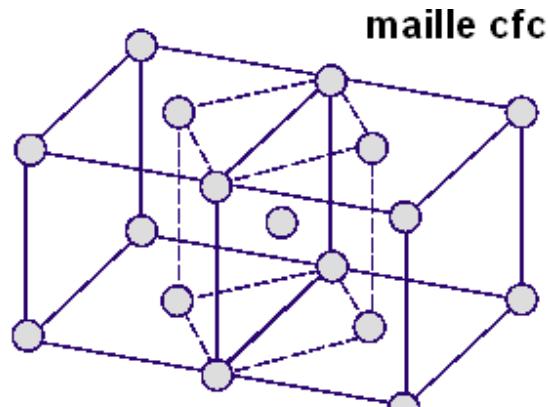
limite de solubilité du carbone :

- austénite : 2% en masse, soit 9% atomique
soit 1 site occupé pour 10 mailles cfc
- ferrite : 0,02% en masse, soit 0,09% atomique
soit 1 site occupé pour 250 mailles cc

lors de la transformation austénite-ferrite, il doit y avoir un fort rejet de carbone (qui doit précipiter sous la forme de carbure...) par diffusion

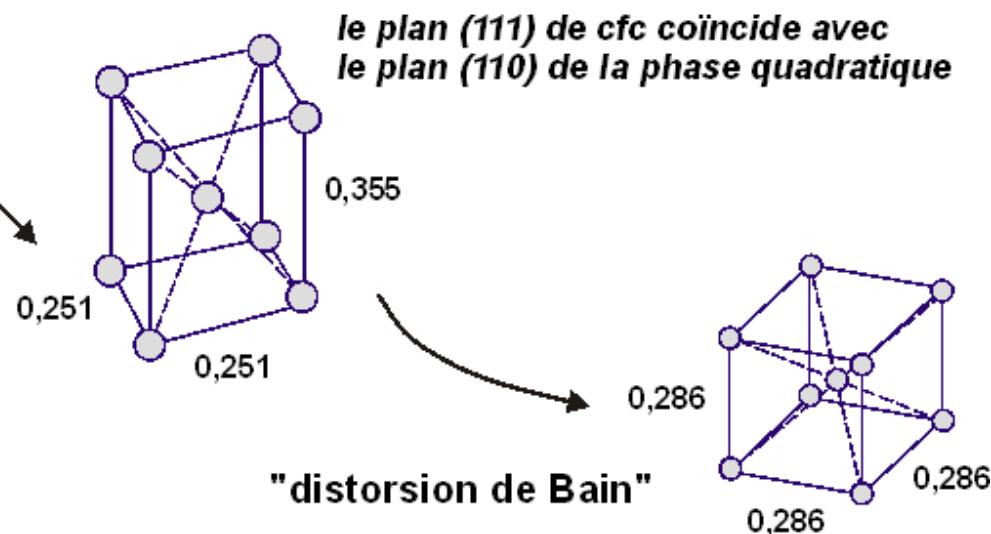
Comment passer d'une structure cfc à une structure cc sans diffusion ?

par une simple distorsion de la maille cfc



maille cfc

maille quadratique



$$R = T \cdot R'$$

T : opérateur

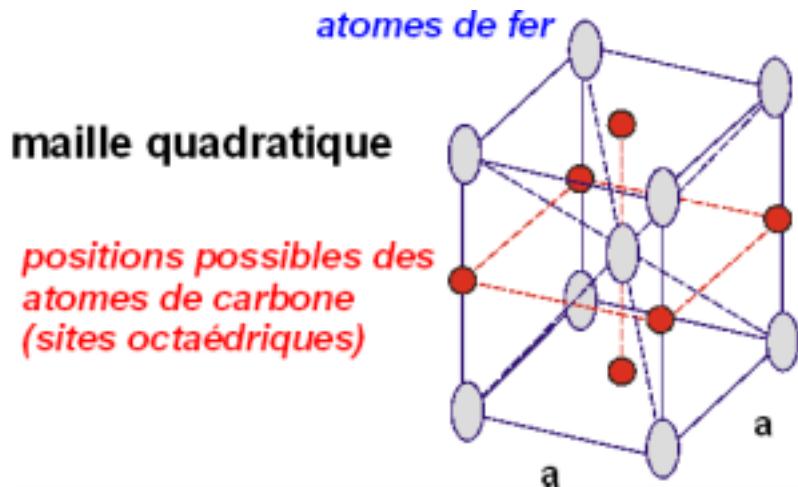
R et R' : les 2 réseaux

B : transformation homogène de Bain (fcf \rightarrow cc)

T=R.S.B S : cisaillement à réseau invariant (glissement cristallographique selon des plans //)

R : rotation en bloc du réseau résultant de B.S

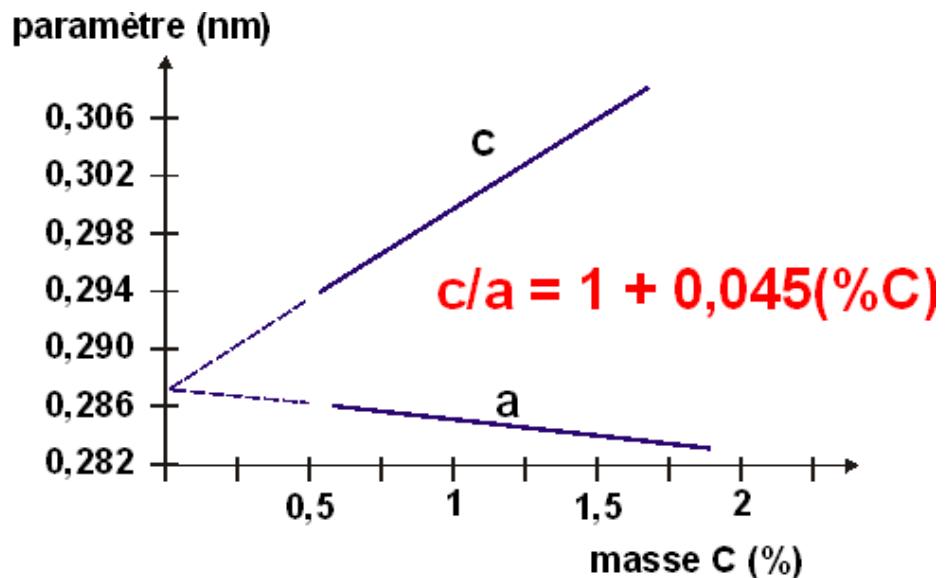
produit matriciel (3x3)



En fait la présence d'atomes de carbone en position interstitielle ne permet pas d'obtenir une maille cc parfaite, elle reste déformée.

Le résultat obtenu n'est pas de la ferrite mais une structure plus dure en raison de la distorsion : la martensite

c'est une structure quadratique sursaturée en carbone



refroidissement rapide (eau)

l'austénite se transforme en martensite (solution solide quadratique sursaturée en carbone)

transformation cfc → cc par cisaillement sans diffusion

La transformation commence à la température Ms et se propage quasi instantanément
elle se termine à la température Mf

La température Ms dépend de la composition chimique :

$$Ms(^{\circ}C) = 539 - 423C - 30,4Mn - 17,7Ni - 12,1Cr - 11Si - 7,5Mo$$

le taux de transformation ne dépend que de la température mais pas du temps de maintien

la fraction transformée à T : $x(T) = 1 - \exp[-\alpha(Ms - T)]$ ($\alpha=0,011$)

fin de transformation : $M_{90\%} = Ms - 210^{\circ}C$
 $M_{99\%} = Ms - 420^{\circ}C$

En générale les transformations martensitiques sont réversibles car en cohérence avec l'ancienne structure et sans modification de la composition chimique...

dans le cas particulier des aciers, elle est irréversible car la martensite se décompose au dessus de 300°C par diffusion du carbone :

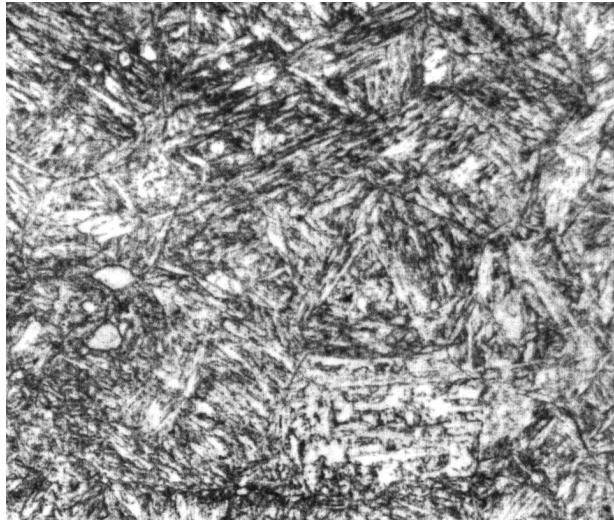


il y a cohérence du réseau de la martensite avec le réseau initial de l'austénite :

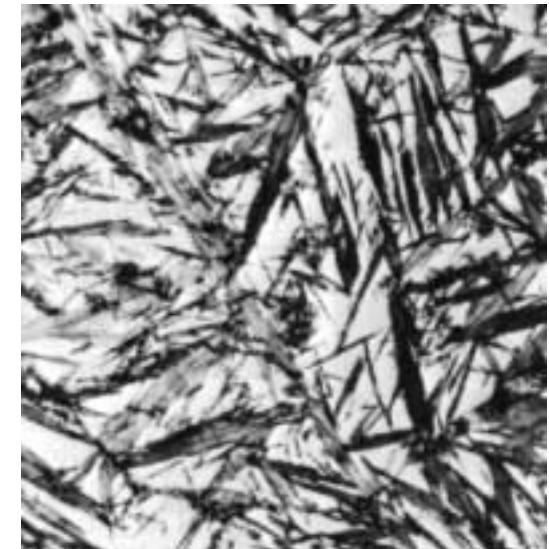
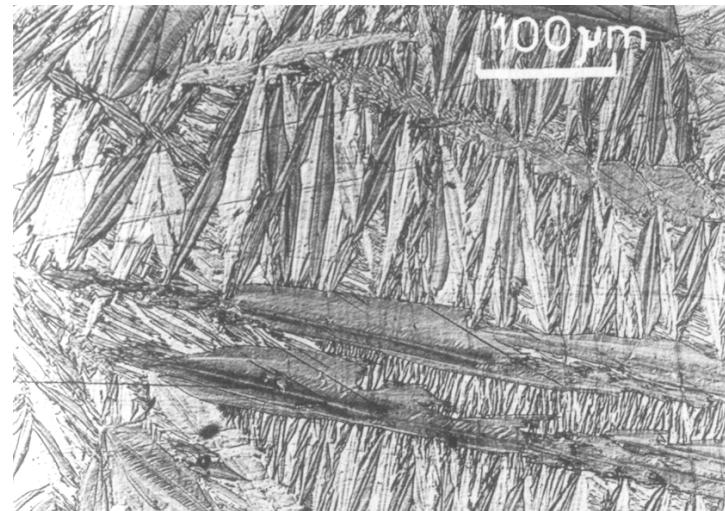
$$(111)\gamma // (110)_M \text{ avec } [110]\gamma // [111]_M$$

morphologie de la martensite :

- en lattes (petites plaquettes de $0,1\mu\text{m}$ d'épaisseur)
- en aiguilles enchevêtrées

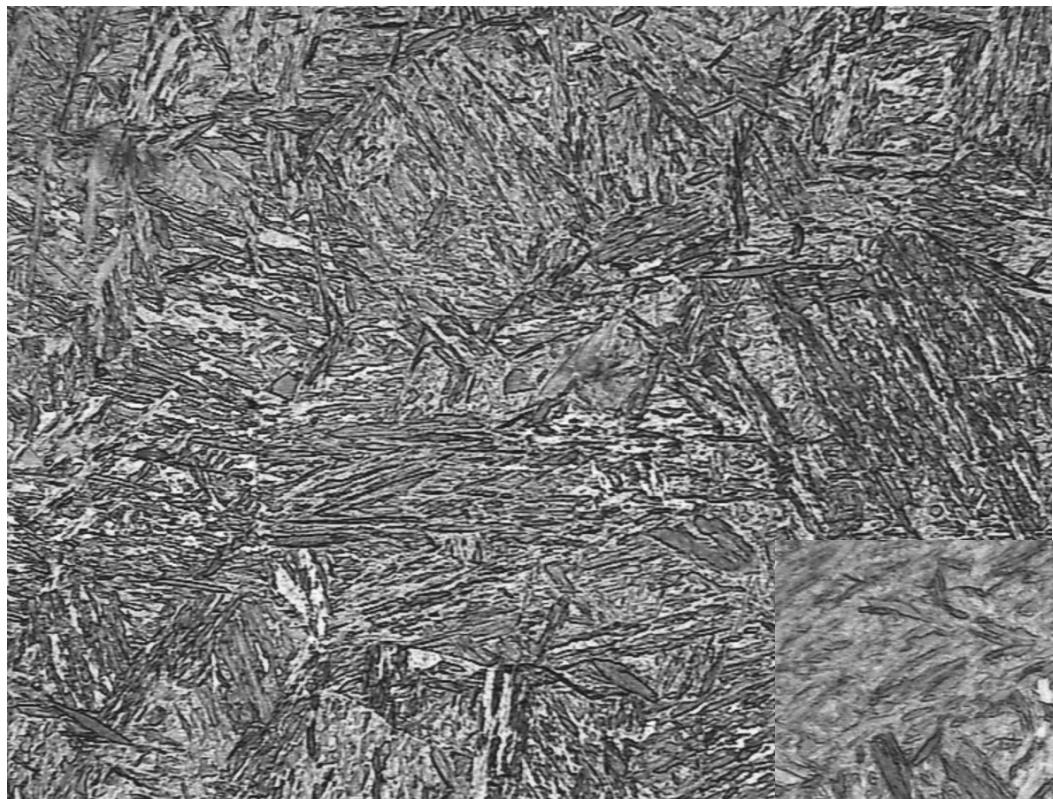


Quelques structures martensitiques en forme d'aiguilles

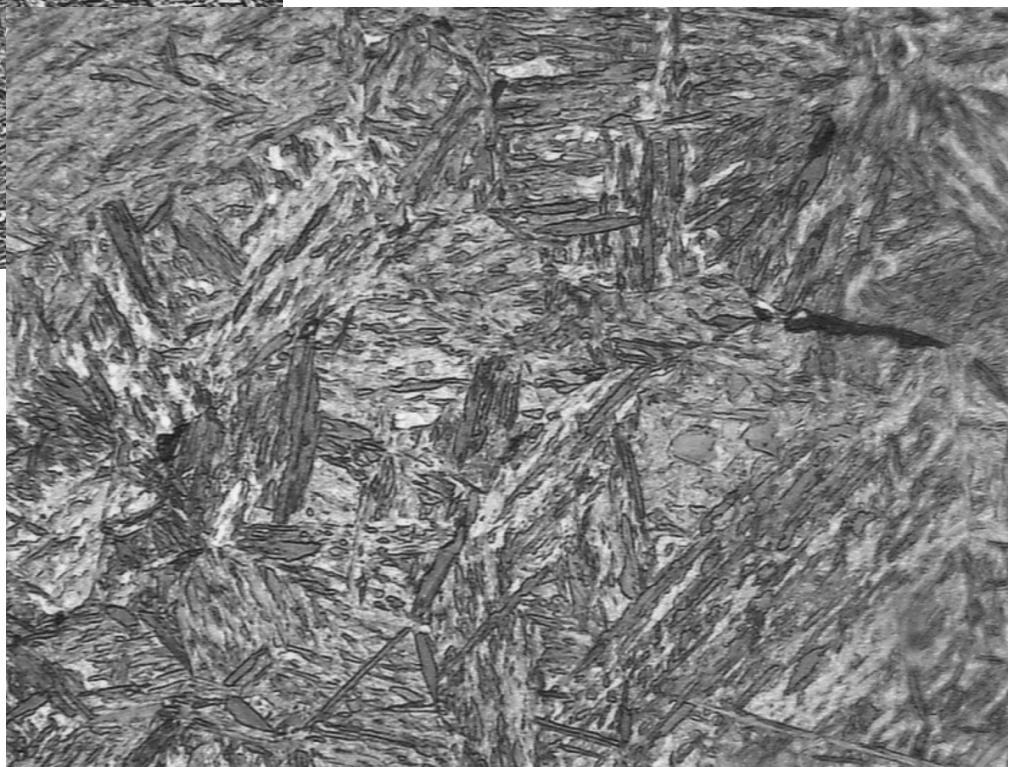


acier à 1,5% C
aiguilles de
martensite sur
fond
d'austénite

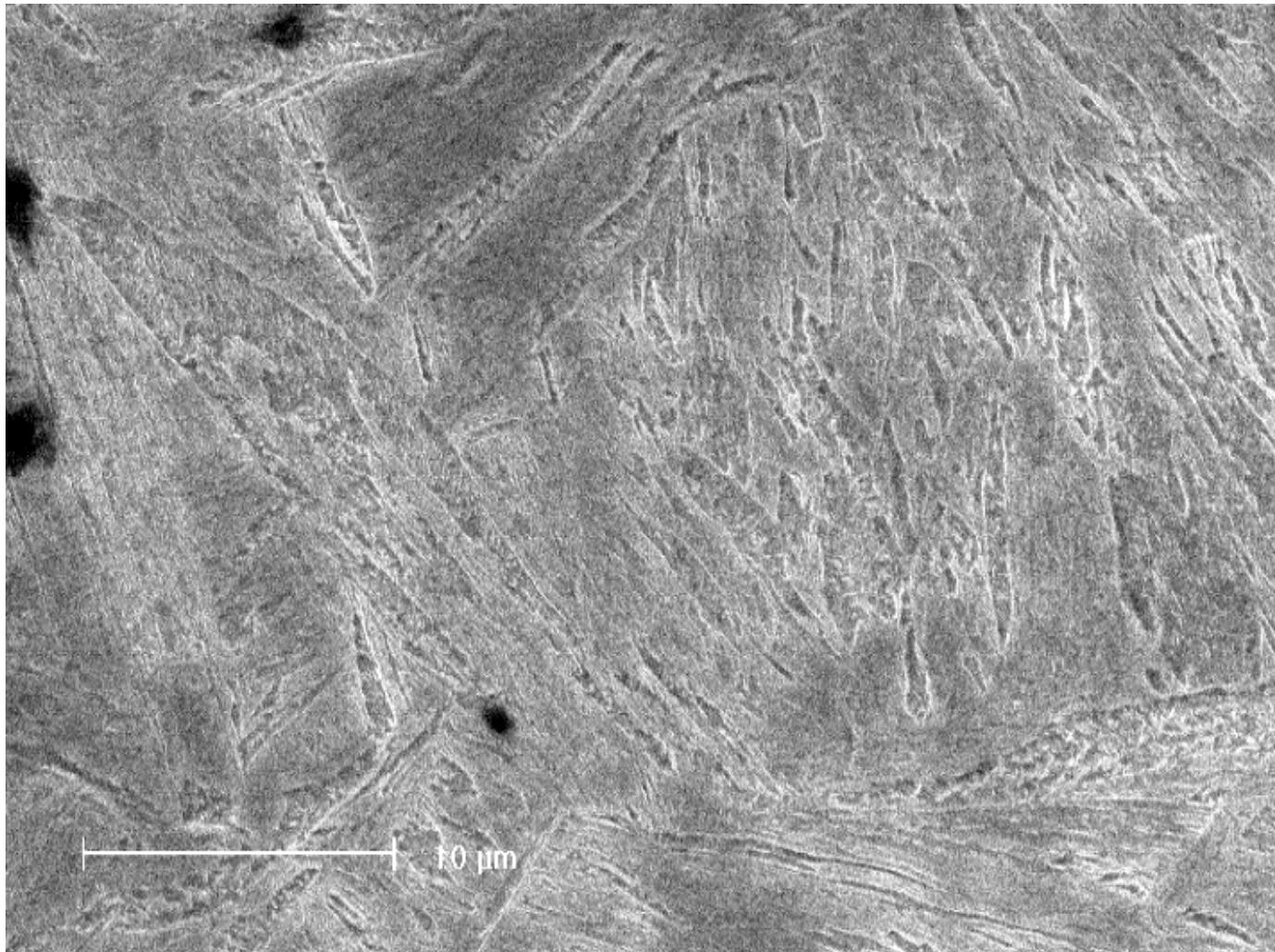
Ferro-nickel
à 31%Ni
austénitisé à 1050°C
trempé à N2 LIQUIDE



**Structure martensitique
observée en optique**

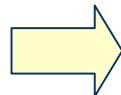


Structure martensitique observée en MEB

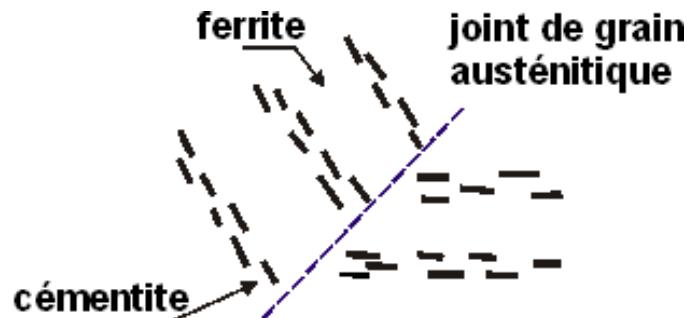


Si la vitesse de refroidissement est intermédiaire (air) et permet une légère diffusion du carbone ?

transformation mi-displasive – mi-diffusive



structures bainitiques (ferrite sursaturée en carbone)



bainite supérieure

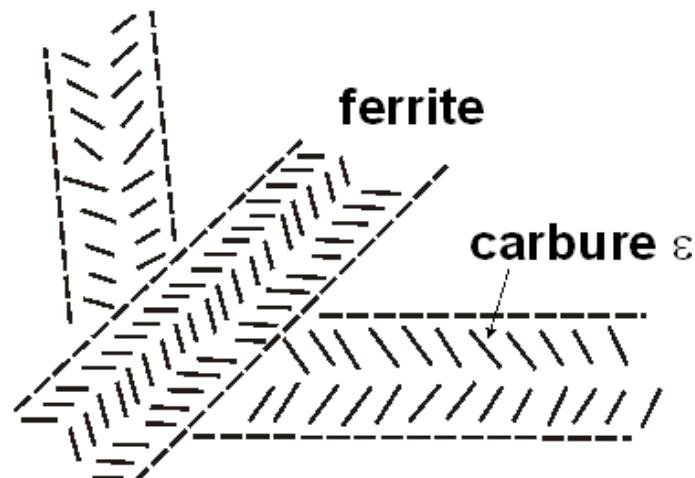
le carbone diffuse suffisamment pour former des carbures à la limite de la ferrite

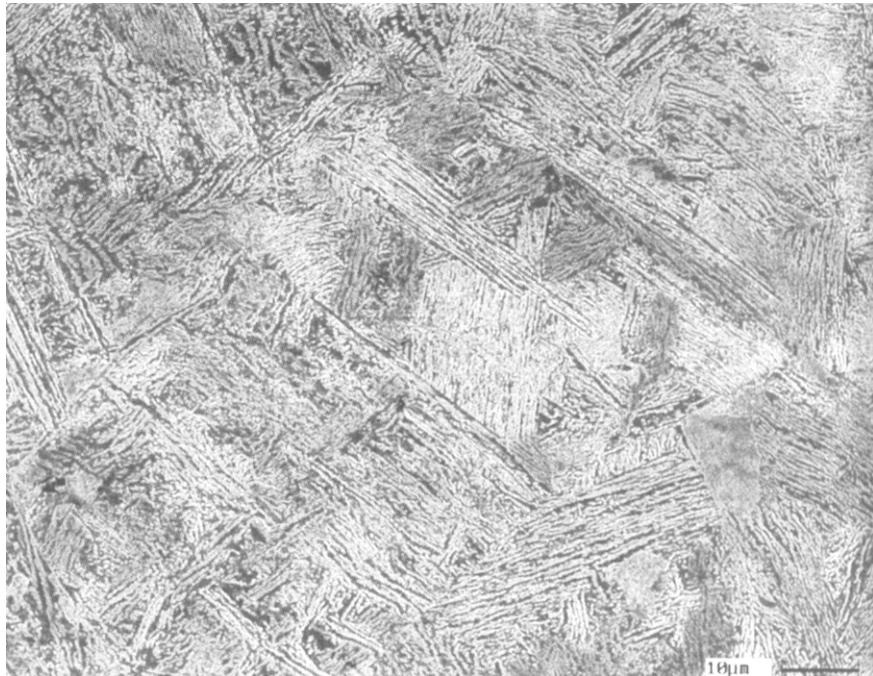
*lattes de ferrite avec des carbures interlattes
(mauvaise résilience)*

bainite inférieure

le carbone précipite dans la ferrite
(carbures ϵ)

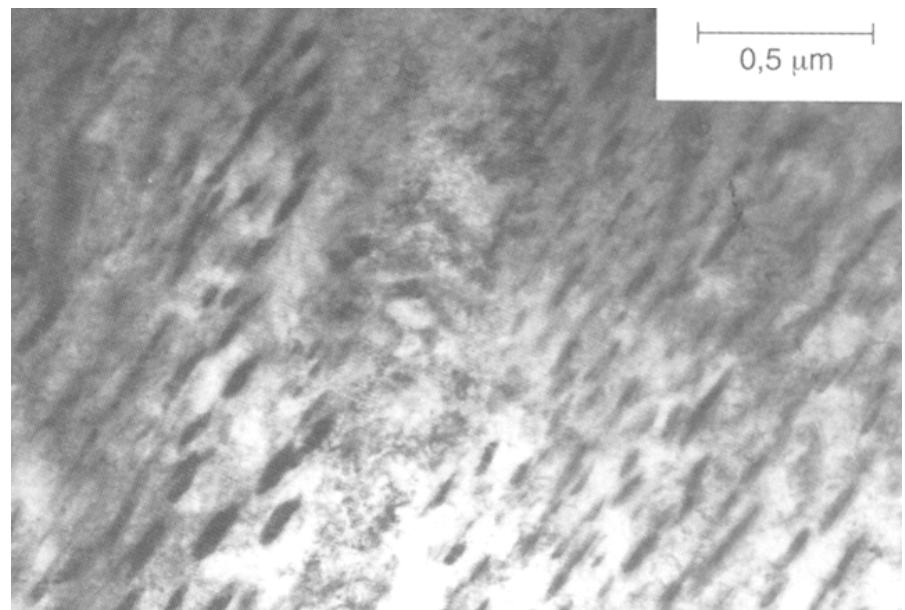
*aiguilles de ferrite avec de fins
précipités de carbures
meilleures caractéristiques mécaniques*



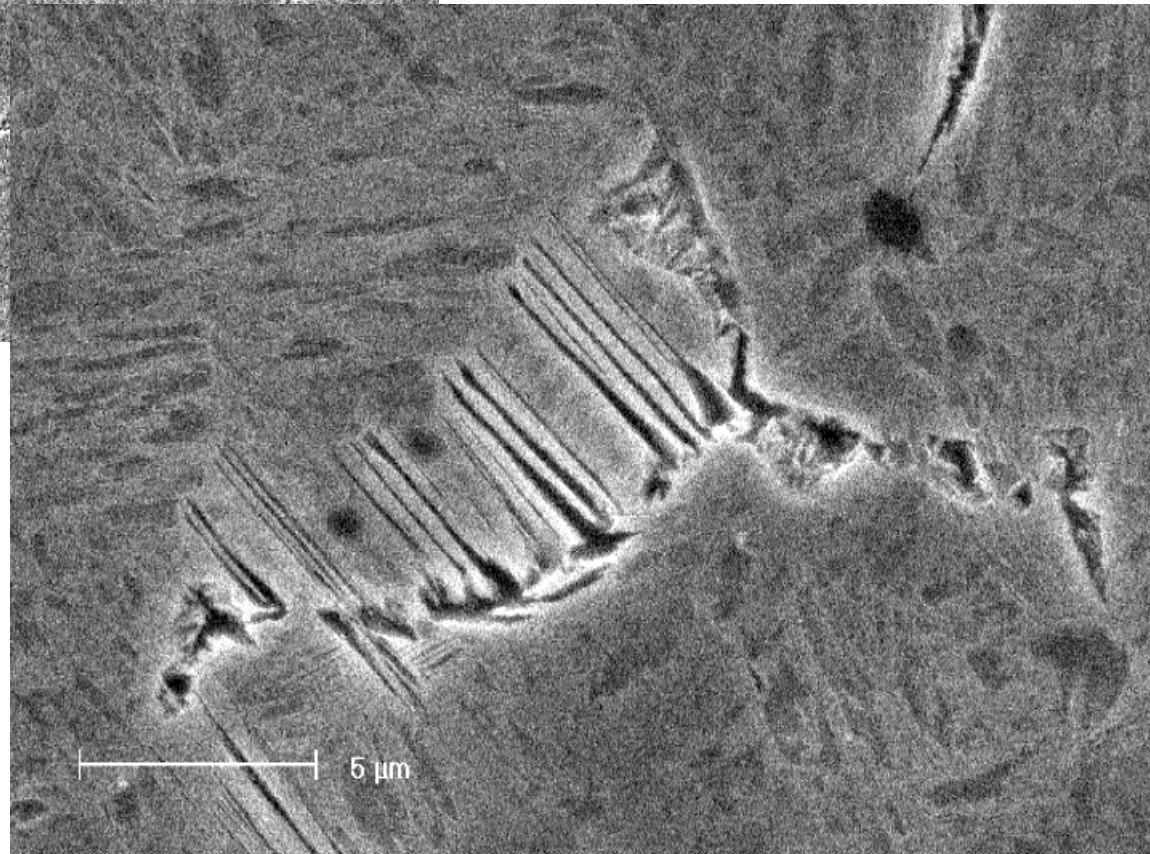
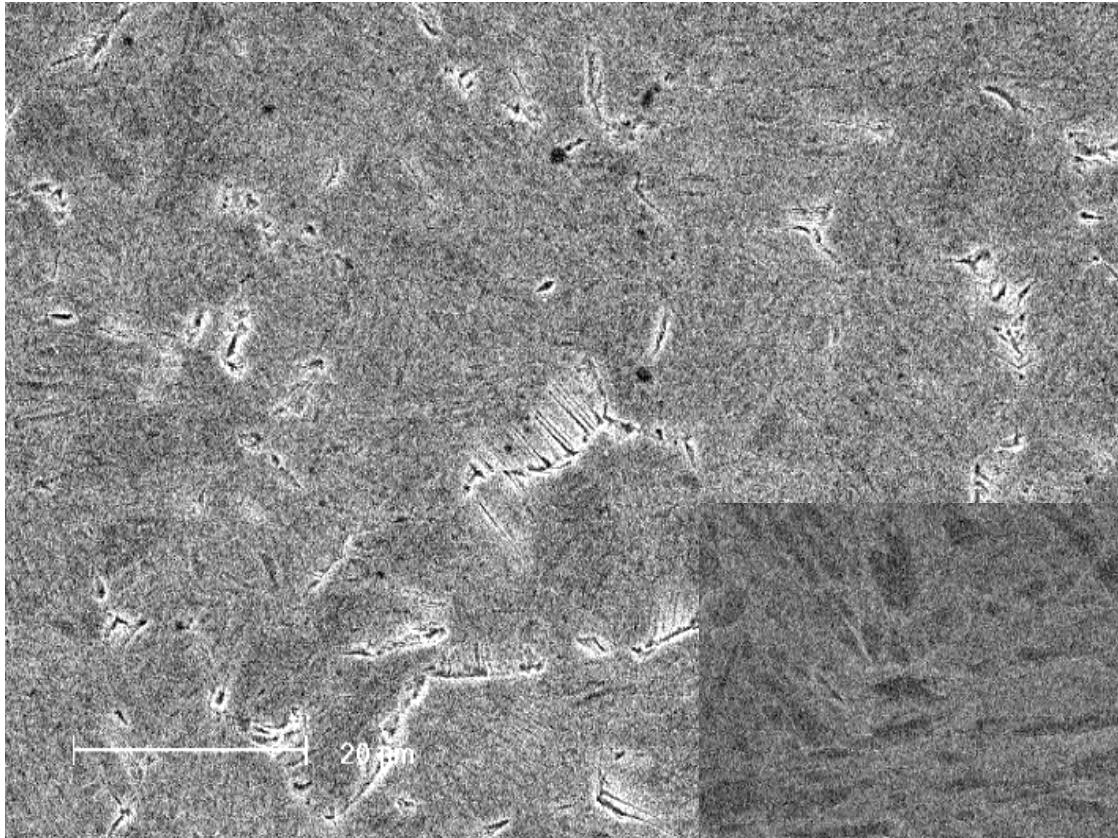


bainite supérieure
acier 0,5%C – 0,8%Mn
(transformation isotherme à 500°C)

bainite inférieure
acier 0,5%C – 0,8%Mn
(transformation isotherme à 300°C)
observation en TEM montrant les
alignements de carbures
dans les lattes



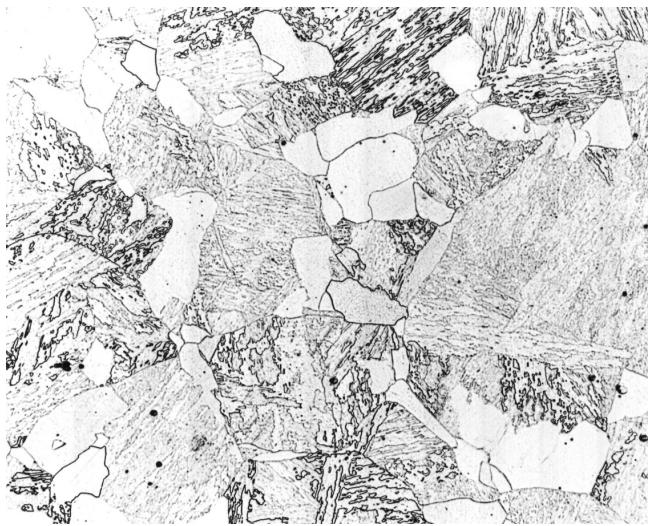
**Bainite supérieure
observée en MEB**



Bainite inférieure
observée en MEB



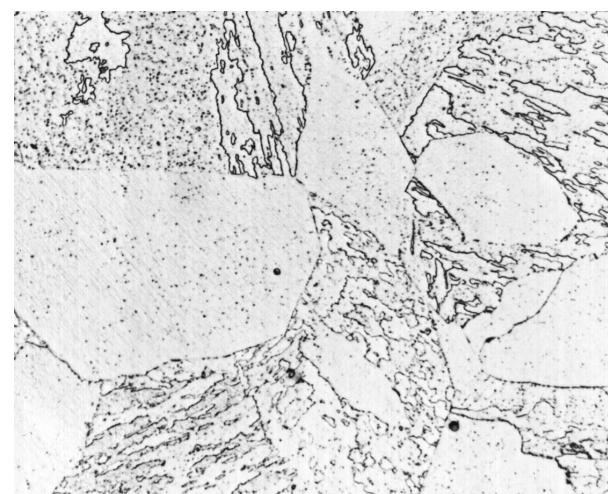
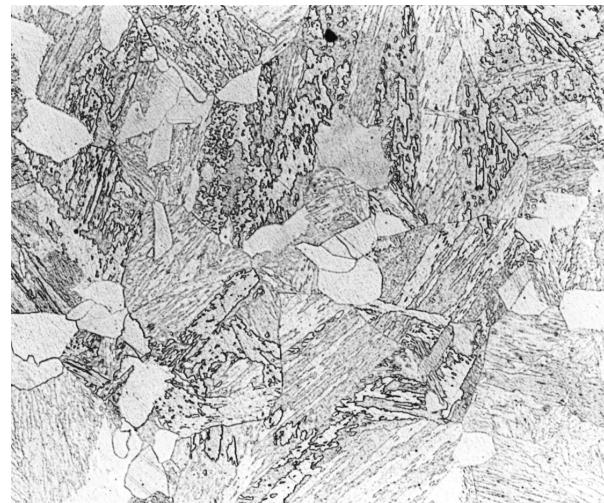
structure ferrito-perlitique



10CD9-10
Chromesco III
2 1/4Cr-1Mo

0,10%C
2,30%Cr
0,9 %Mo
0,24%Si
0,16%Ni
0,12%Cu

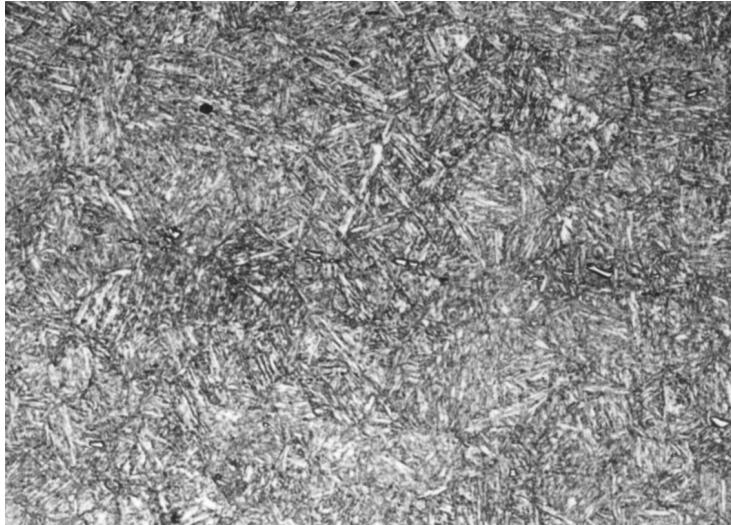
acier ferritique



↔
100 μm

↔
25 μm

structure trempée
(austénite + martensite)



100 μm

28CDV 5-08

0,28% C

0,5 % Si

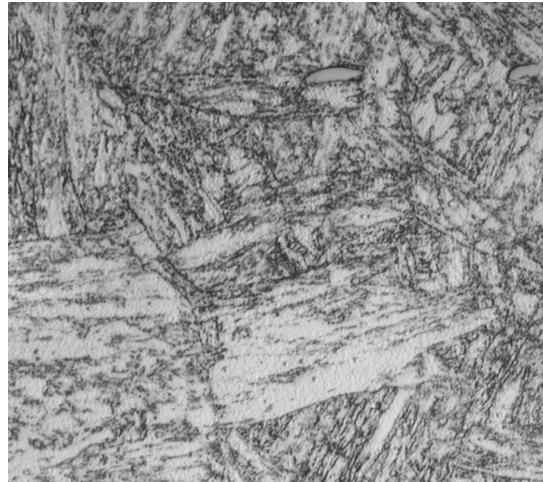
0,8 % Mo

1,6 % Cr

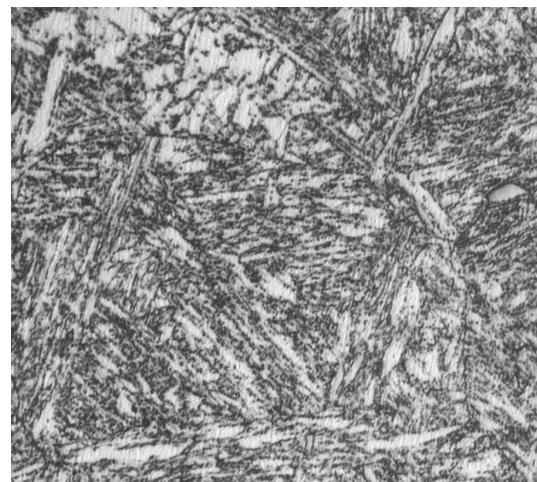
0,4 % V

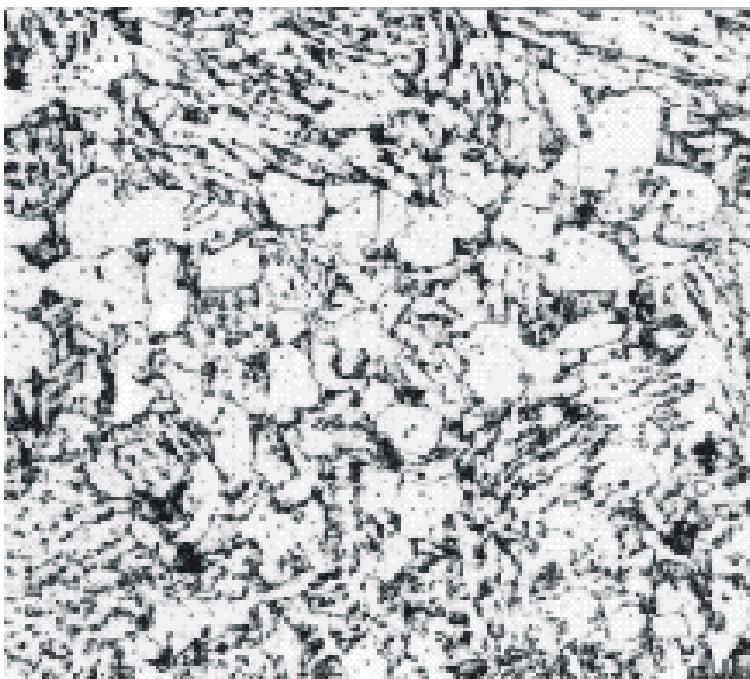
0,18% Ni

acier pour boulonnerie



25 μm





x400

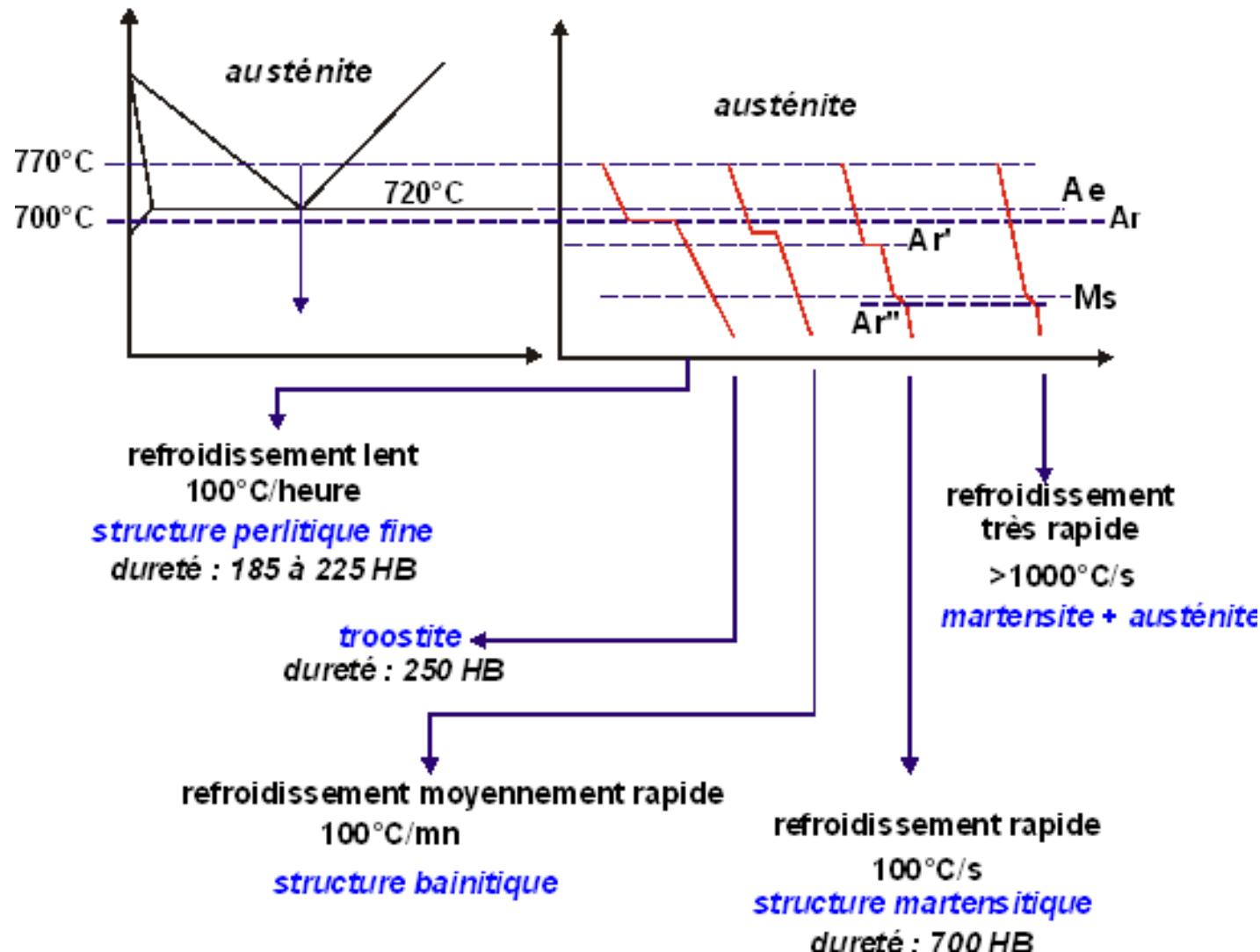
Coupe métallographique de l'acier
utilisé pour la réalisation
des cuve de réacteurs nucléaires
acier 16MND5 (ASTM A508)

structure ferrito-bainitique

éléments d'addition						impuretés	
Mo	Mn	Ni	Cr	Si	C	P	Cu
0,50	1,4	0,60	0,15	0,30	0,15	0,008	0,08

vitesse très lente
(four éteint) :
austénite → ferrite + perlite

vitesse très rapide
(azote liquide) :
austénite → martensite + austénite résiduel



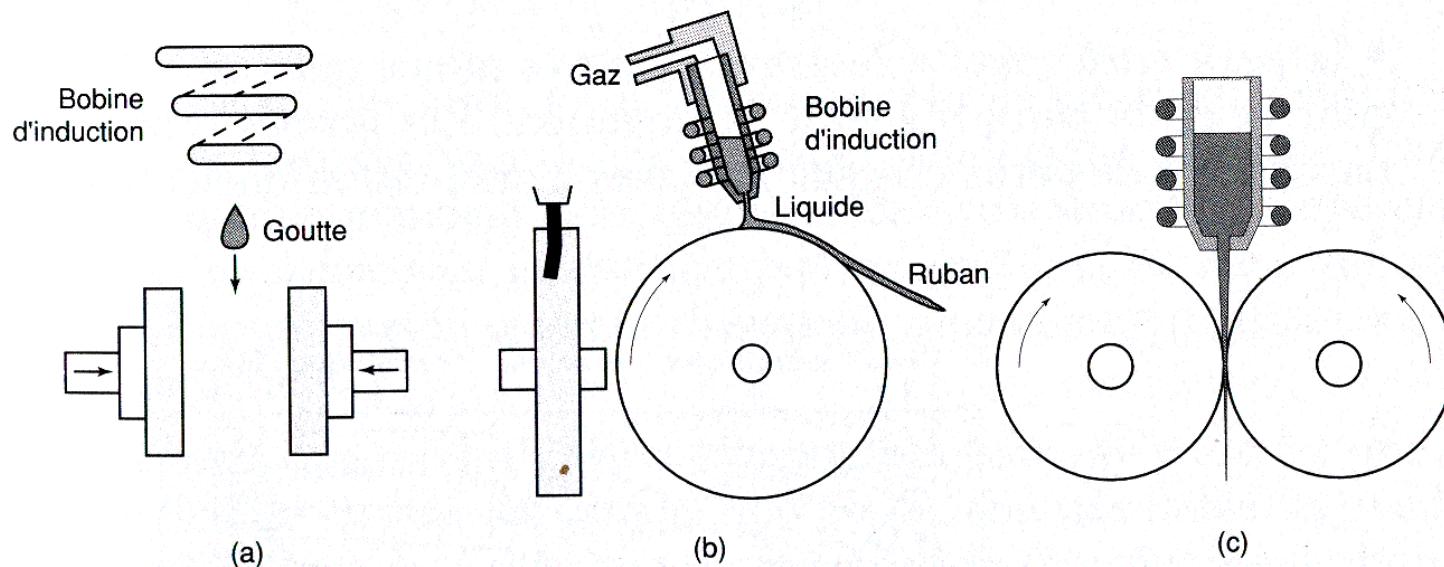
Solidification ultra-rapide ($>10^6$ °C/s)

- cristallisation extrêmement fine (submicronique ou nanométrique)

$$D \approx R^{-m} \quad (R \text{ vitesse de refroidissement})$$

- formation de composés intermétalliques métastables

- formation de phases amorphes (verres métalliques)

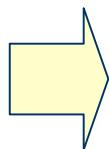


a – écrasement entre 2 plaques

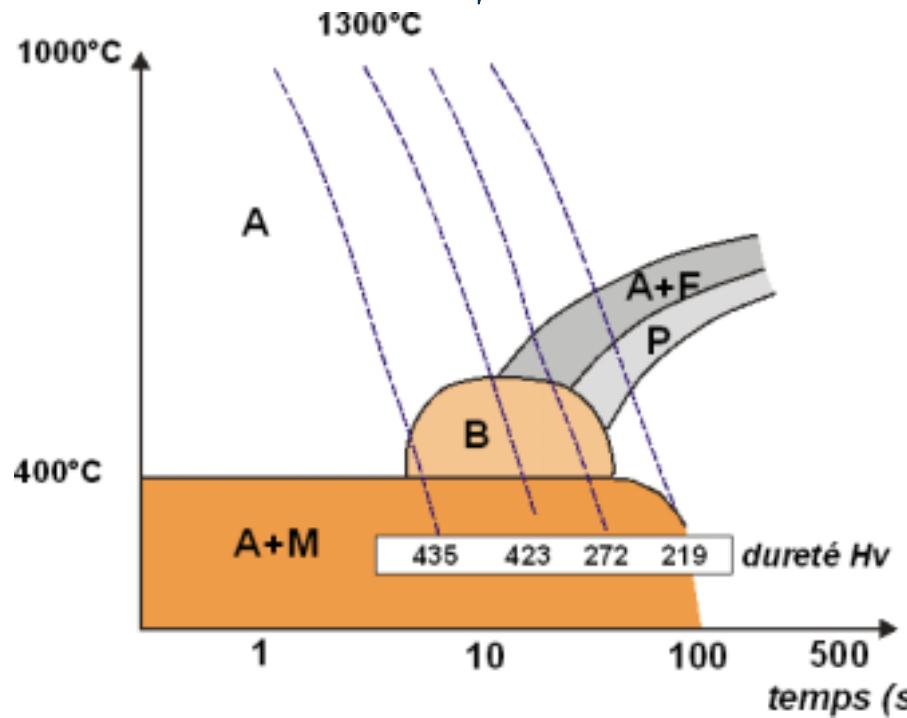
b – solidification sur une roue tournante (« melt spinning »)(vitesse de 10 à 60 m/s)

c – solidification entre 2 roues tournant en sens inverse

Les diagrammes de phases supposent des transformations infiniment lentes et ne peuvent servir pour déterminer les microstructures après traitement thermique...

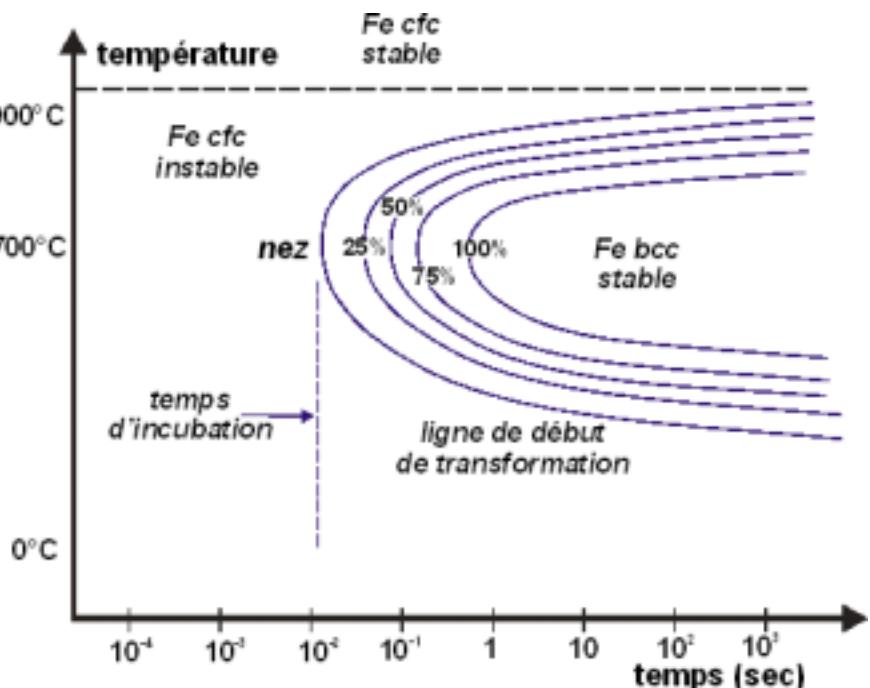


les diagrammes TRC (transformation en refroidissement continu)
les diagrammes TTT (température- temps-transformation)



TRC

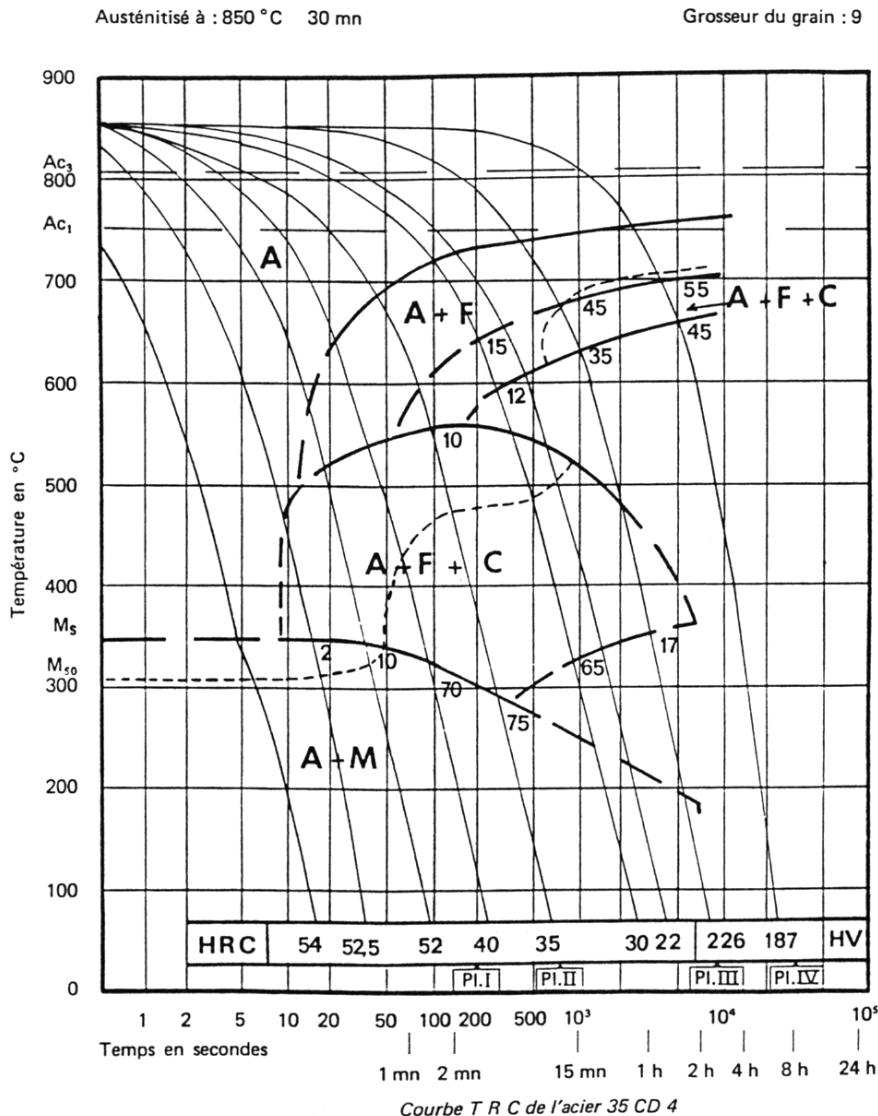
austénitisation, trempe



TTT

revenu, recuit

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %
0,36	0,77	0,28	0,010	0,019	0,16	0,96	0,28



Exemple de courbe TRC de l'acier 35 CD 4

austénisé 30mn 850°C

- A** : austénite
- F** : ferrite
- M** : martensite
- C** : cémentite

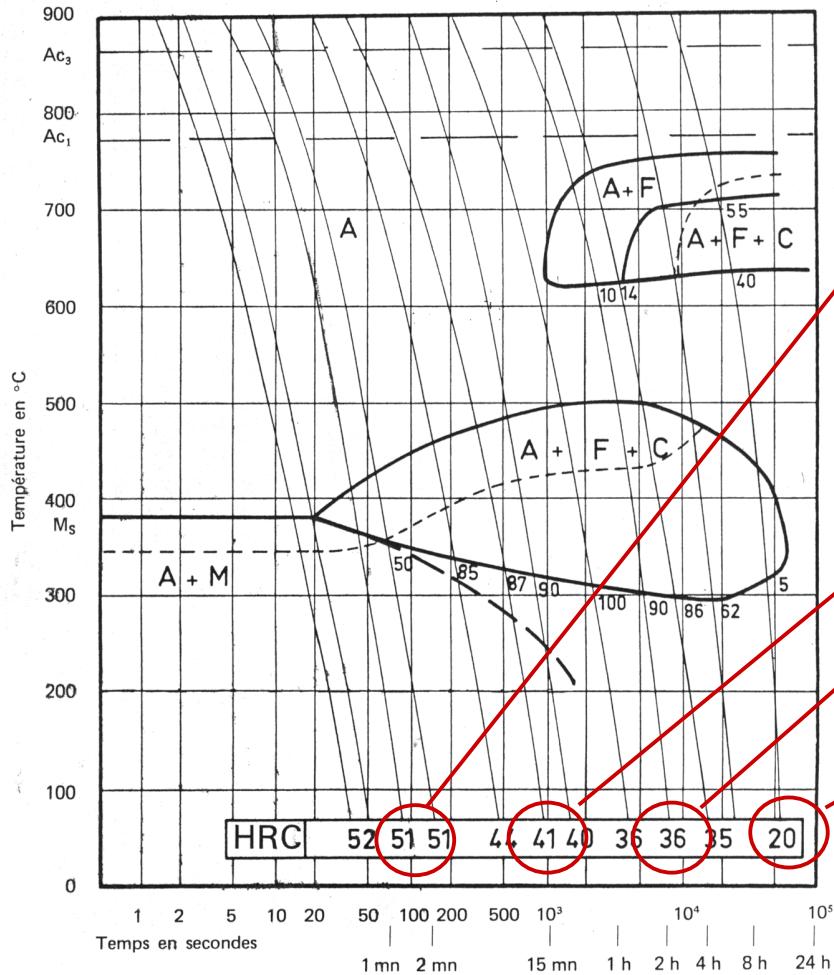
28 CDV 5-08

Micrographies après transformation en refroidissement continu (x 540)

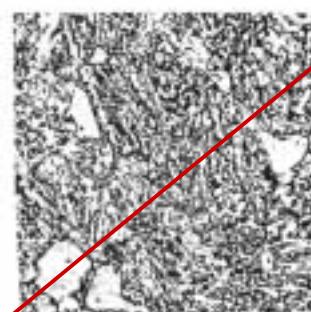
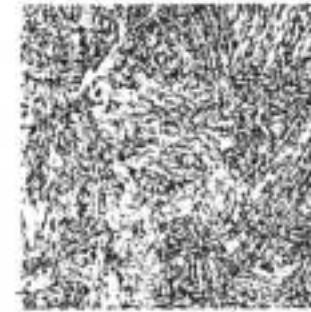
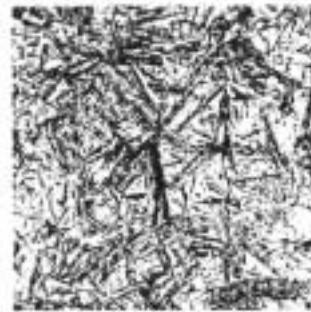
C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %	V %
0,26	0,58	0,49	0,010	0,014	0,18	1,65	0,84	0,07	0,380

Austénitisé à 1050 °C 30 mn

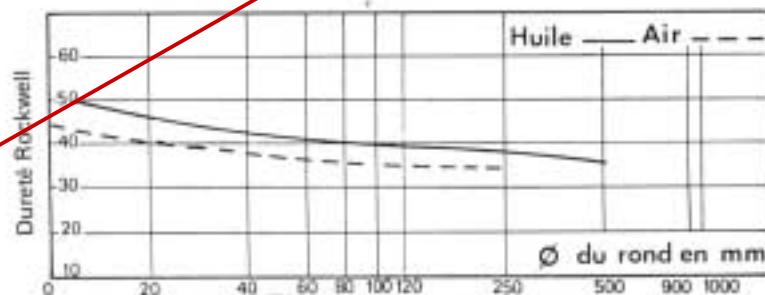
Grosseur du grain : 5-7



Micrographies après transformation en refroidissement continu (x 540)



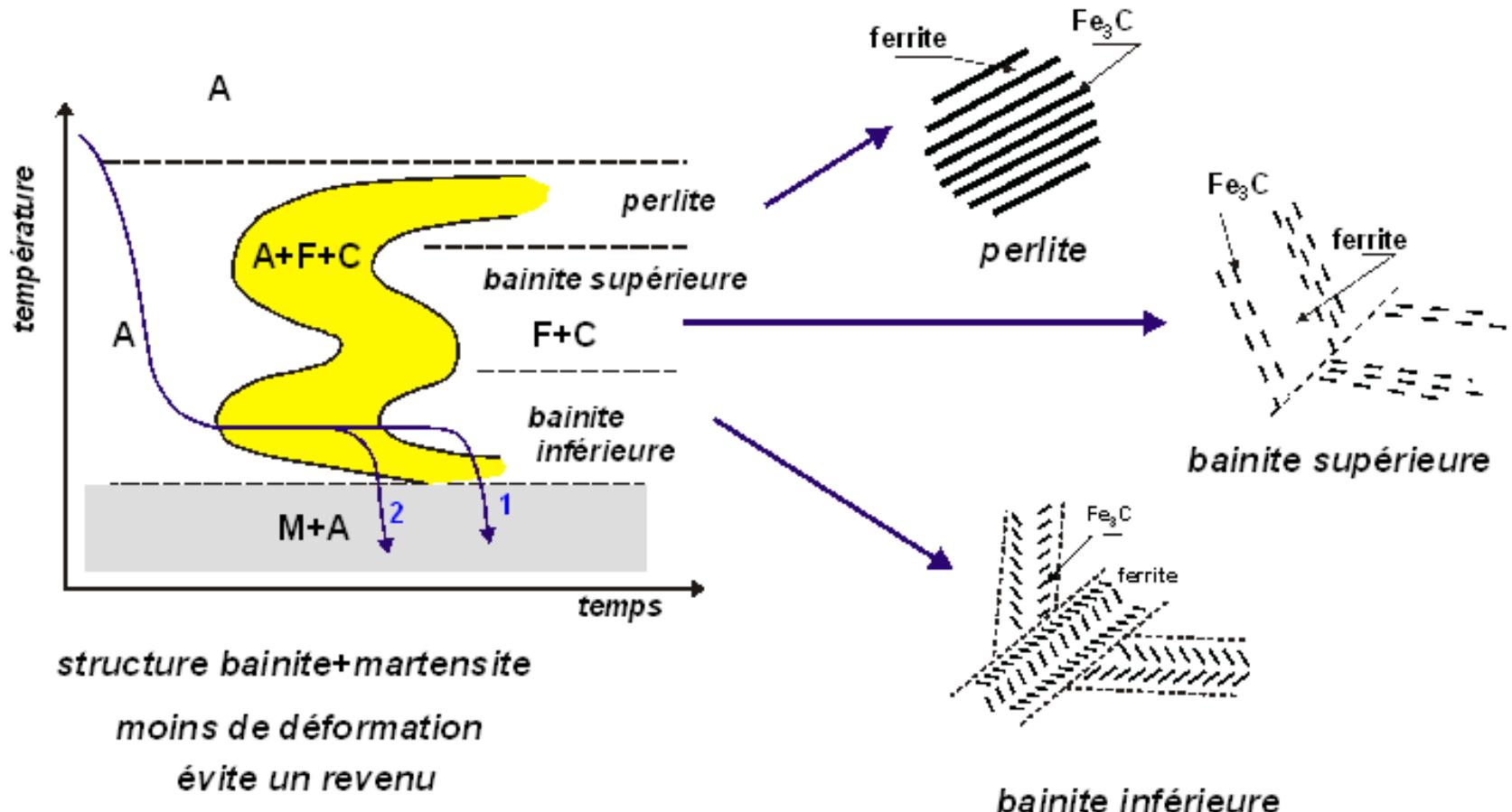
Dureté à cœur de ronds après trempe



trempe étagée bainitique (austempering)

1 - totale

2 - partielle

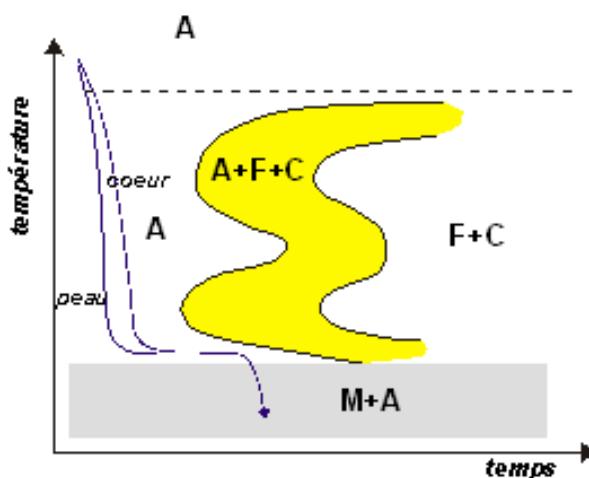
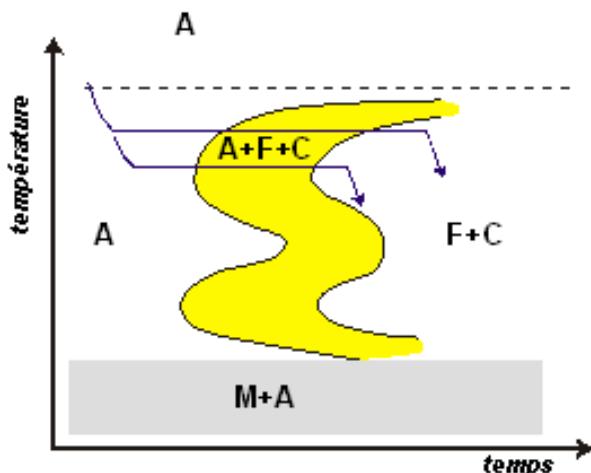


Traitements isothermes

recuits isothermes

$Ac_1 - 50^\circ\text{C}$

courbes TTT



trempe étagée martensitique (martempering)

homogénéiser la température de la pièce avant la trempe

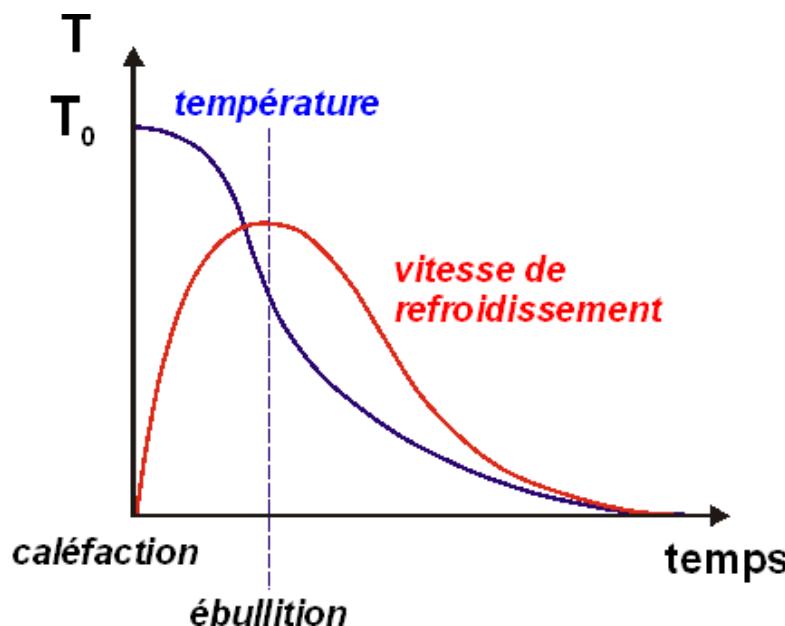
durée assez longue mais sans début de transformation

diminution des contraintes

La trempe : les facteurs déterminants

la microstructure est directement liée à la vitesse de refroidissement qui dépendra de :

- la conductibilité thermique des alliages _____
- la forme et les dimensions de la pièce à tremper _____
- des transferts thermiques à l'interface
- de la nature et de la conductibilité thermique du fluide



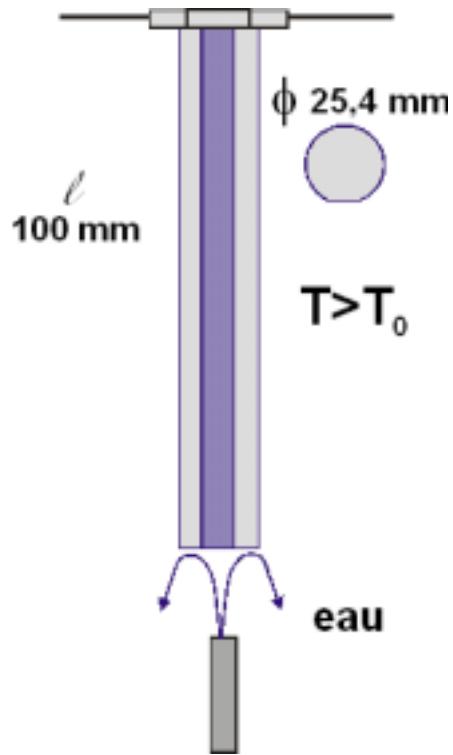
petite pièce :
trempe uniforme

grosse pièce :
trempe superficielle

→ contraintes, fissures
→ traitement de surface

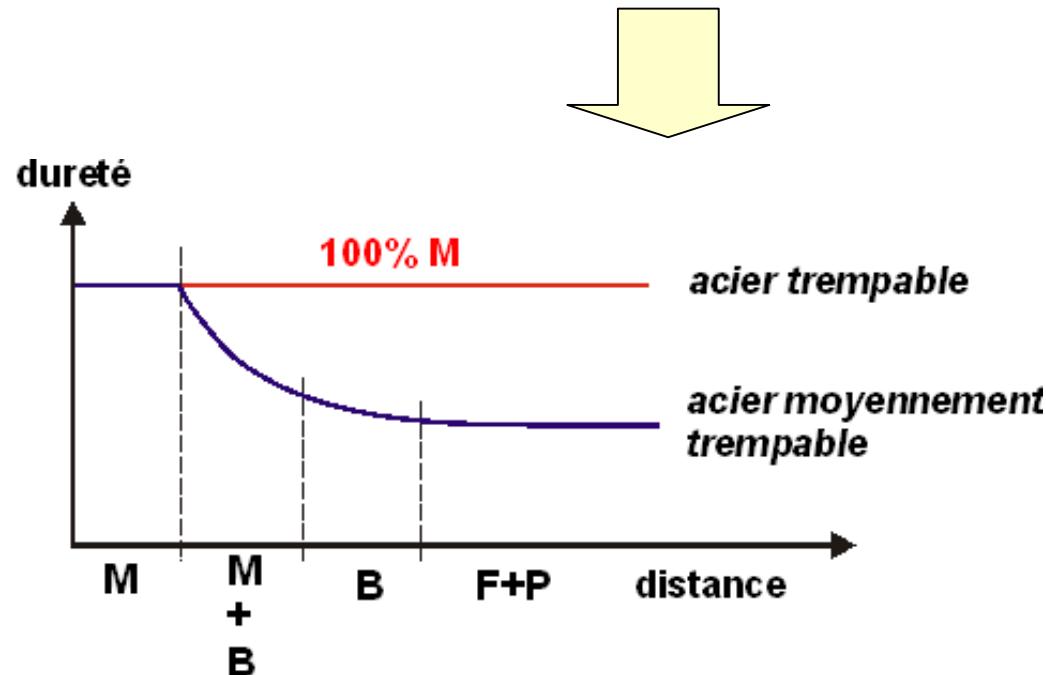
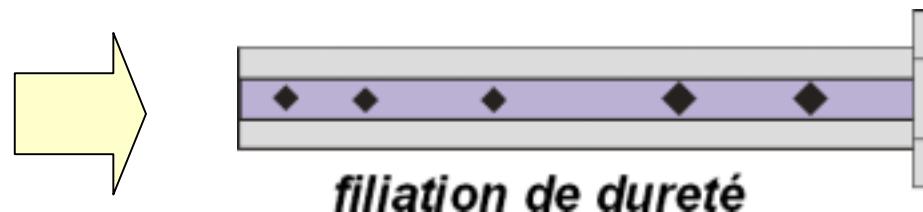
test de trempabilité :
essai Jominy

Essai Jominy



barre cylindrique avec un méplat, austénitisée puis refroidie à une extrémité par un jet d'eau.

Une filiation de dureté effectuée sur le méplat permet de juger de la trempabilité de l'acier ...



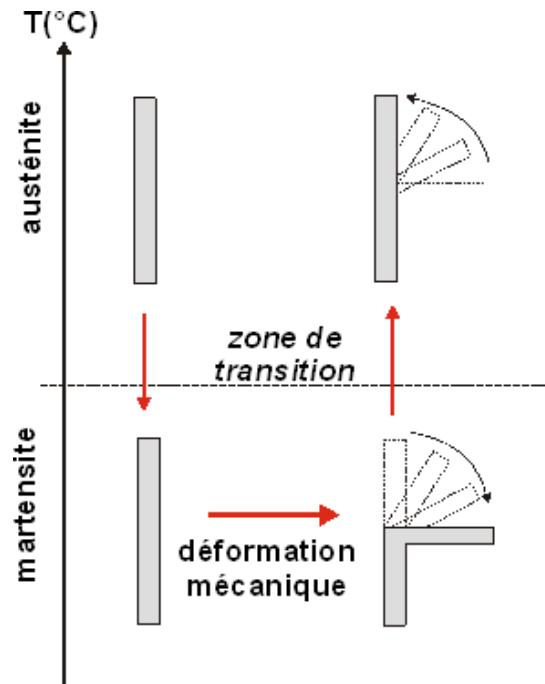
Une application des transformations martensitiques : les alliages à mémoire de forme

- Nitinol (Ni50-Ti50)
- CuZnAl

la température de transition peut varier entre -200 et +120°C

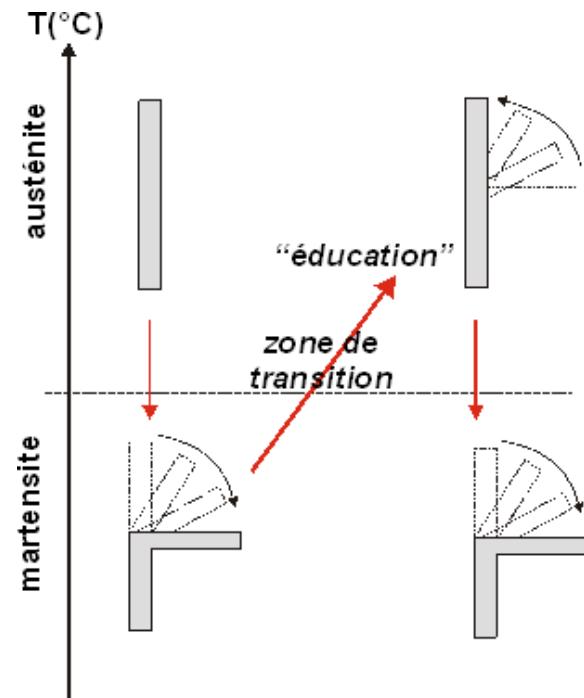
(CuZnAl : +170°C)

- applications :**
- déploiement d'antennes satellites
 - sertissage
 - articulations (robotique)
 - etc...



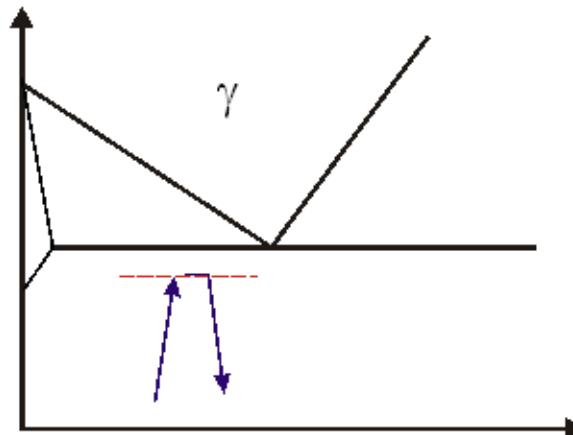
simple effet :
après une déformation mécanique
retrouve sa forme initiale par une
transformation « martensitique »

effet réversible :
après un processus thermomécanique
('éducation') le changement de forme
s'obtient par un changement de
température



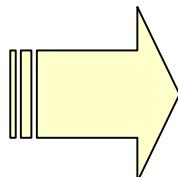
**I'acier trempé est souvent trop dur et fragile
généralement on fait suivre la trempe d'un traitement de revenu**

principe du revenu :



*on chauffe au dessous de AC1 puis
refroidissement relativement rapide*

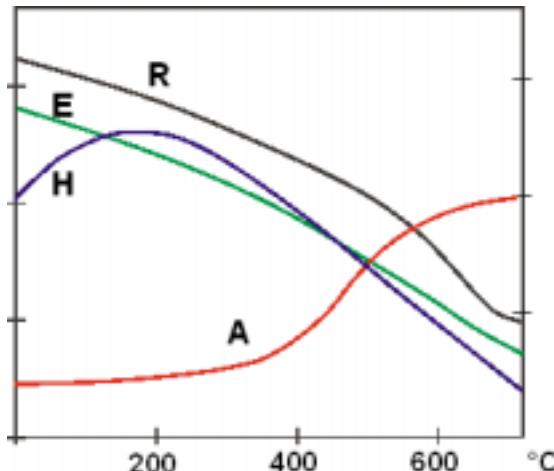
on recherche un équilibre physico-chimique (ferrite-cémentite)



- atténuation des contraintes internes
- diminution de la fragilité
- amélioration des propriétés mécaniques (allongement, résilience...)

mais : diminution de la dureté, de la limite élastique et de la résistance à la traction...

variations des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu



- R : résistance à la traction
- E : limite élastique
- H : dureté
- A : allongement

→ 100 à 150°C migration du C hors de la martensite (pré précipitation)

(C<0,25%)

$$130 - 250^\circ\text{C} \quad \alpha' \xrightarrow{\text{martensite}} \alpha'' + \varepsilon(\text{Fe}_5\text{C}_2) \quad (\eta \text{ Fe}_2\text{C} \text{ et } \chi \text{ Fe}_3\text{C}_{1,05})$$

légère augmentation de la dureté (précipitation)

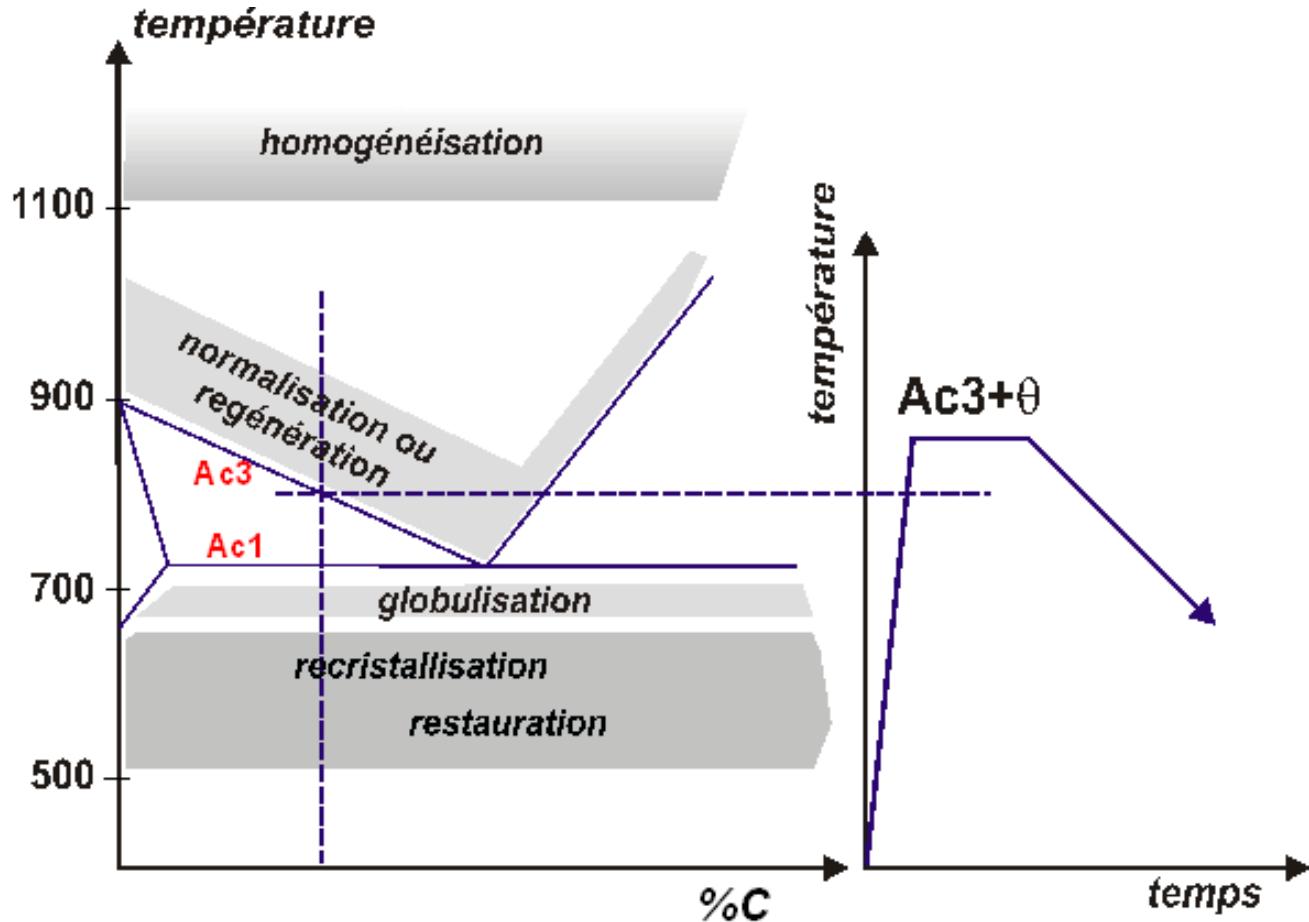
200 - 300°C $\gamma \longrightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ léger adoucissement

austénite
résiduelle

$$300 - 450^\circ\text{C} \quad \alpha'' + \varepsilon \longrightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C} \quad \textit{adoucissement important}$$

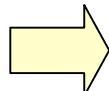
$>450^\circ\text{C}$ coalescence de la cémentite
 → sorbite (anologue à la troostite) adoucissement rapide

Les Recuits

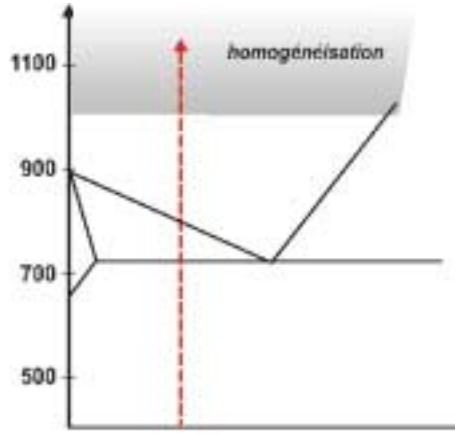


- chauffage au dessus de Ac_3 , maintien puis refroidissement lent
- chauffage au dessous de Ac_3 , maintien et refroidissement lent

le revenu est une variété particulière de recuit, destinée à réduire les effets de la trempe



retrouver un état d'équilibre thermodynamique avec formation de structures ferrite-carbures



recuit d'homogénéisation

entre 1000 et 1200°C

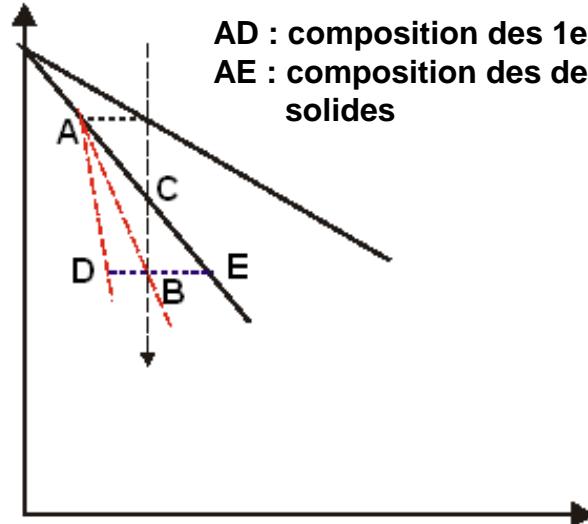
La solidification introduit de fortes ségrégations ➔

recuit d'homogénéisation :

- passage en phase γ (*austénitisation à haute température*)
- diffusion en phase solide
- refroidissement lent

AC : solidus théorique
AB : solidus moyen réel

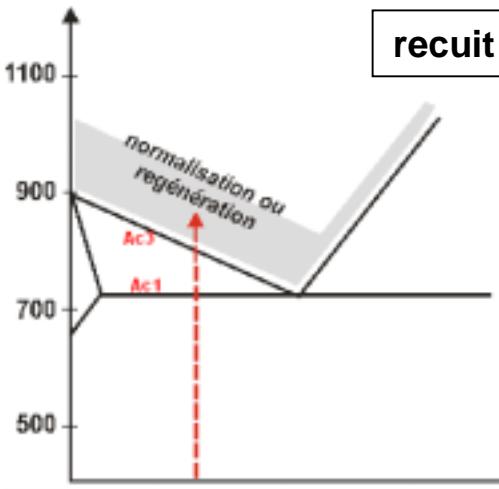
AD : composition des 1er solides
AE : composition des derniers solides



- !
- a)** *Si la température est trop élevée*
risque de « brûlure » de l'acier (eutectique involontaire)
➔ *fusion partielle des joints avec oxydation*

b) *Si le maintien est trop long*
risque de surchauffe
➔ fort grossissement des grains
➔ nécessite un recuit de régénération

recuit de régénération ou de normalisation



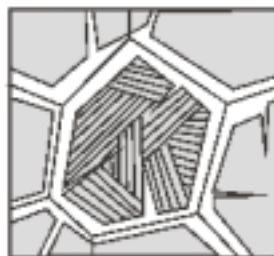
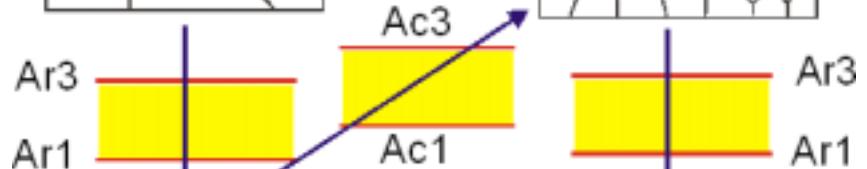
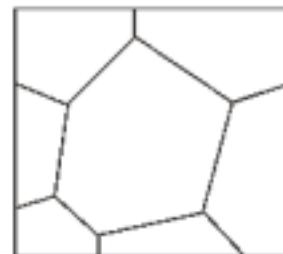
entre Ac_3 et $Ac_3 + 50^\circ C$

surchauffe \rightarrow grossissement du grains
 ↓
refroidissement
structure ferrite - perlite grossière



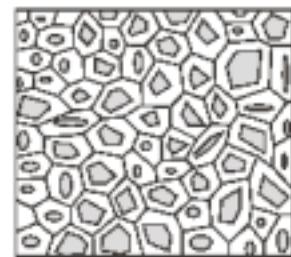
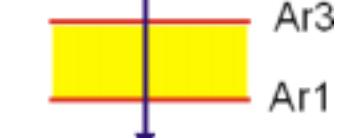
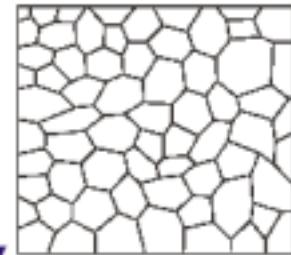
- ➔ chauffage au dessus de Ac_3
(en évitant un maintien de longue durée)
- ➔ régénération du grain

γ surchauffée



ferrite-perlite
aciculaire

γ régénérée



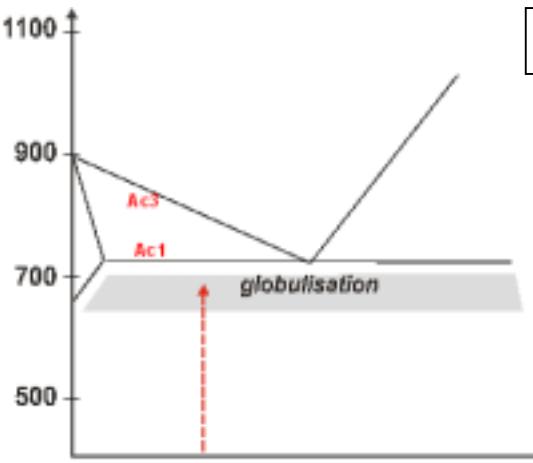
ferrite-perlite
cellulaire

(en évitant un maintien trop long autour de Ac_1 pour éviter une nouvelle croissance du grain)



refroidissement assez lent pour obtenir
une structure perlite-ferrite assez fine

recuit de globulation ou de sphéroïdisation



chauffage juste en dessous de Ac1 puis maintien prolongé et refroidissement lent

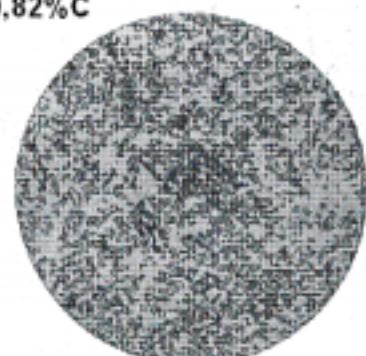
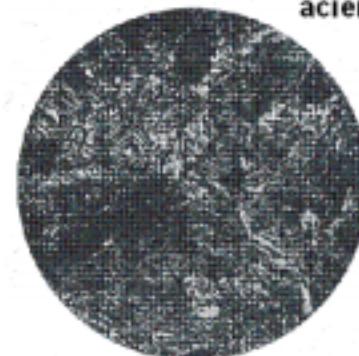
perlite lamellaire



perlite globulaire

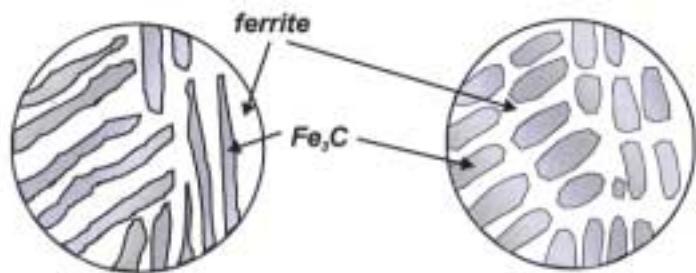
(meilleur comportement pour le filage)

acier à 0,82% C



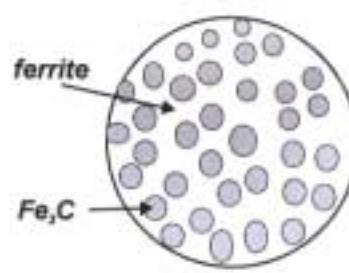
recuit à 720°C
refroidi lentement
perlite lamellaire

recuit à 1000°C
perlite globulaire

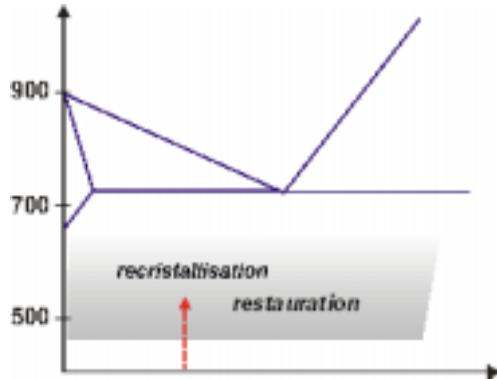


état initial
perlite lamellaire

état intermédiaire
début de globulation

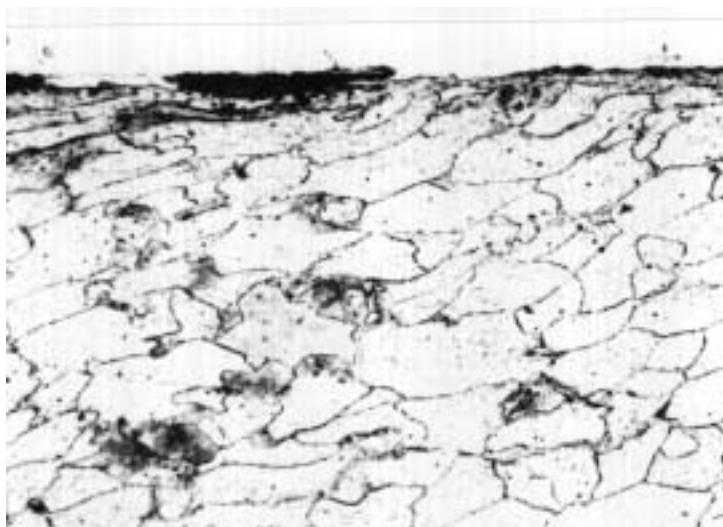
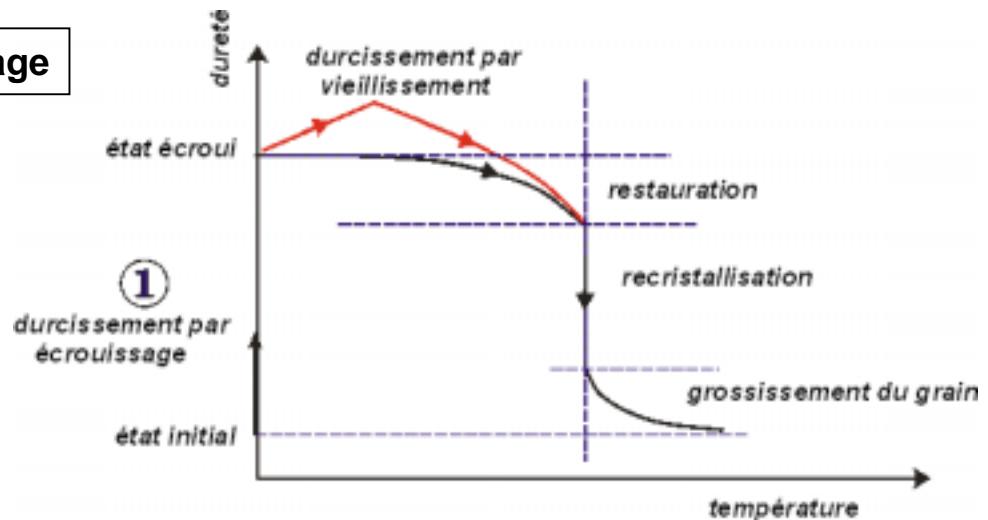


état final
globulation



recuit de restauration et de recristallisation

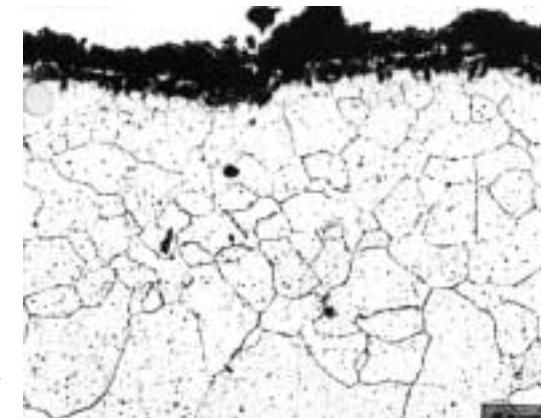
a) écrouissage



*acier écroui en surface par le laminage
(déformation des grains)*

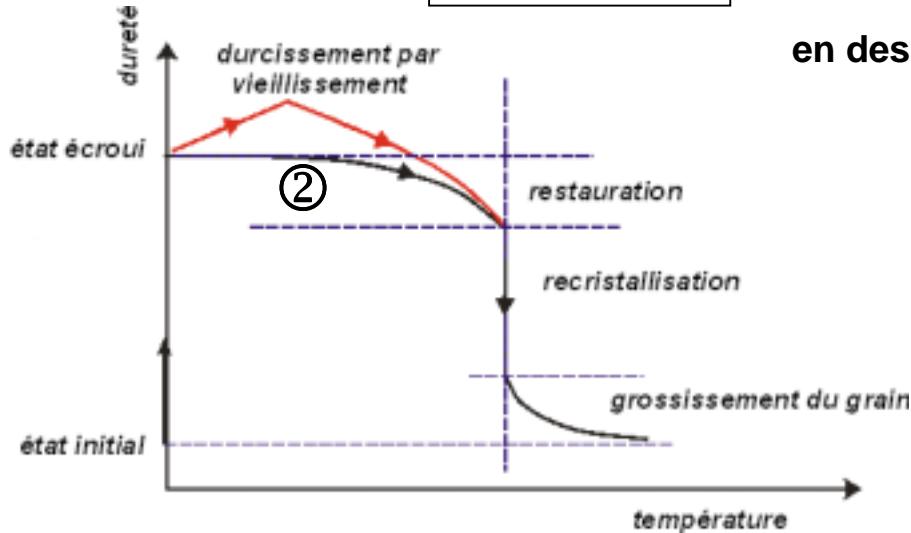
après certains traitements mécaniques (laminage)

fort écrouissage à froid → fragilisation

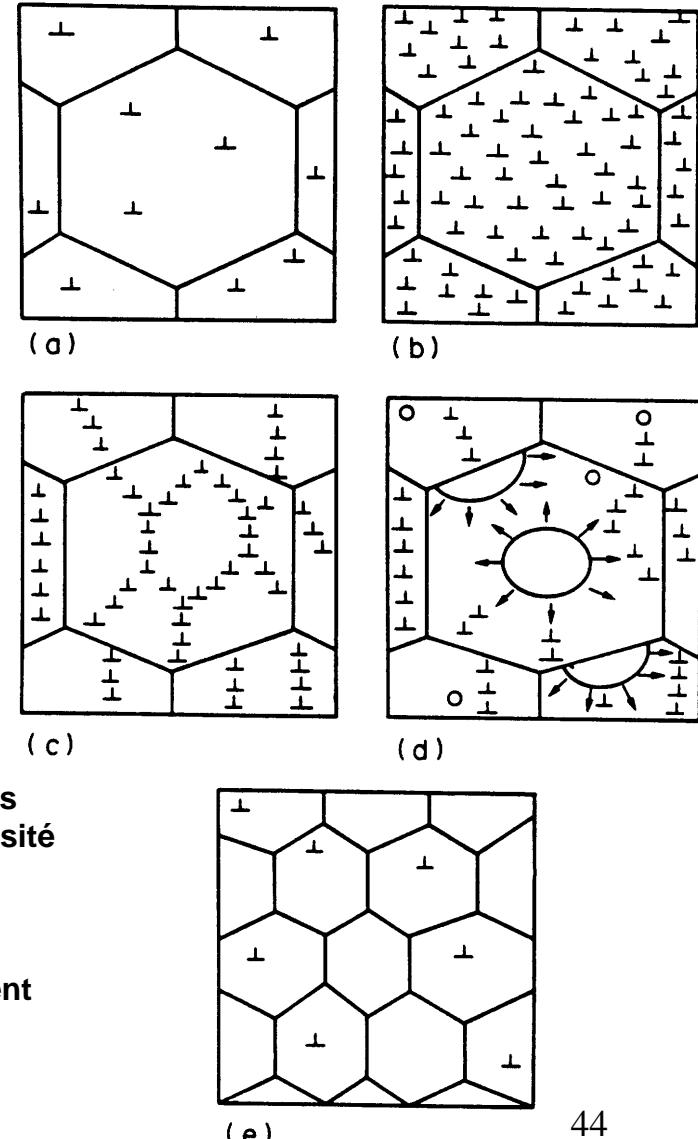


acier non écroui

b) restauration



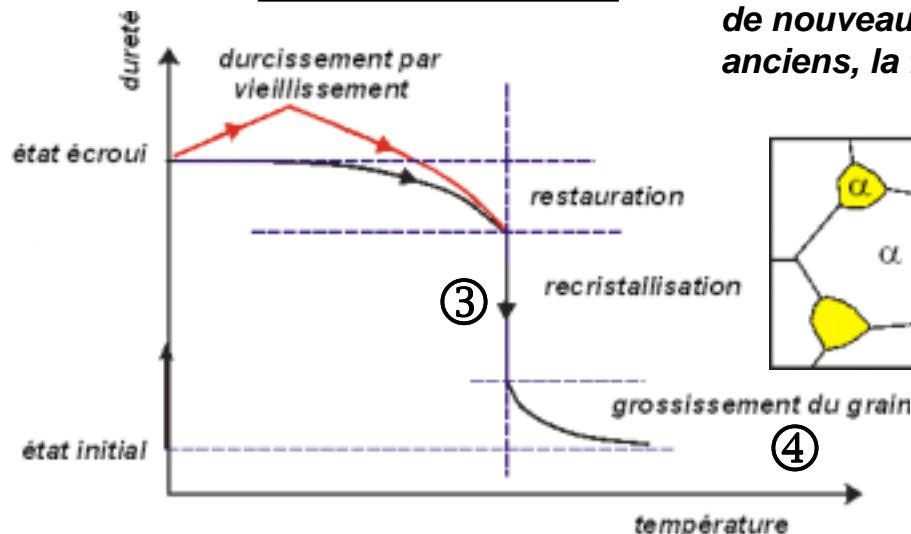
en dessous de la température de recristallisation



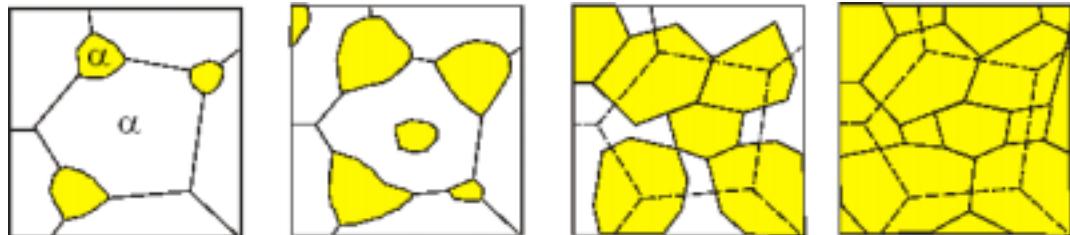
- pas de modification apparente de la structure
- annihilation partielle des défauts (lacunes, dislocations)
- peut favoriser une précipitation de carbures, d'où une augmentation de la dureté

- a) le métal de départ possède une faible densité de dislocations
- b) la déformation plastique accroît considérablement cette densité
- c) le recuit produit dans un premier temps une restauration : les dislocations se déplacent pour adopter une configuration d'énergie minimale
- d) au cours du recuit de nouveaux grains germent et grossissent
- e) le métal entièrement recristallisé est constitué de nouveaux grains non déformés

c) recristallisation



de nouveaux germes naissent et croissent au détriment des anciens, la force motrice étant l'énergie d'écrouissage



les grains croissent de manière isotrope jusqu'à ce qu'ils se rencontrent

mécanisme de germination - croissance

loi de croissance (équation de Kolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami)

$$V = 1 - \exp(-Bt^n)$$

V : fraction volumique recristallisée
B : facteur dépendant de la température
n : entre 1 et 2

d) grossissement des grains

modèle de croissance « 6-N » (Neumann-Mullins)(modèle géométrique)

$$dA/dt = K_N(N-6)$$

A : aire d'un grain

N : nombre de sommets du polygone (nombre de grains voisins)

les grains ayant moins de 6 sommets disparaissent rapidement...

en réalité les grains sont des polyèdres irréguliers, ce qui complique les choses !

modèle thermodynamique :

réduction de l'énergie interfaciale par déplacements des joints

$$D = D_0 + B\sqrt{t}$$

ou

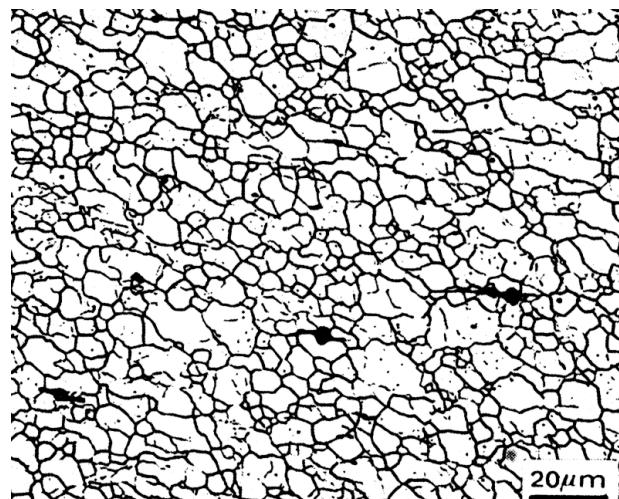
$$D^n = D_0^n + B t$$

(loi de Hillert)

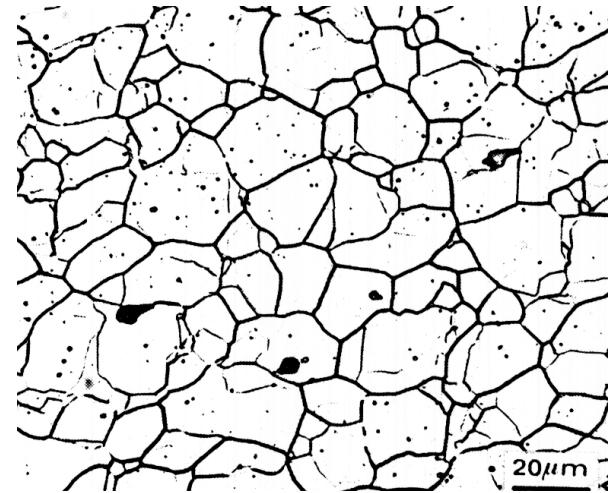
D : diamètre moyen des grains

Croissance de grains

acier inoxydable
ferritique



900°C



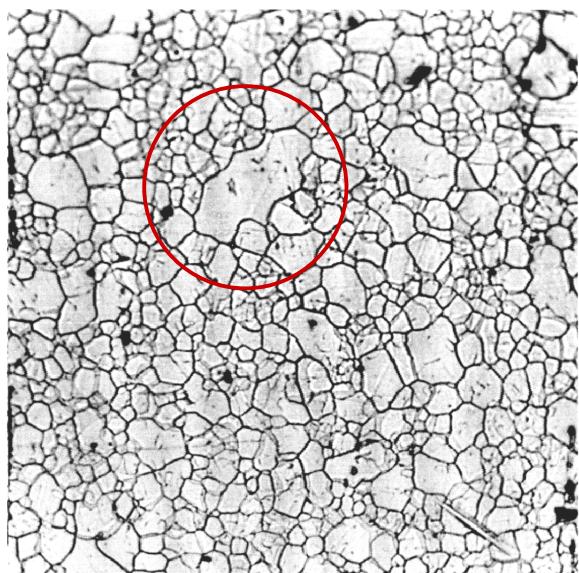
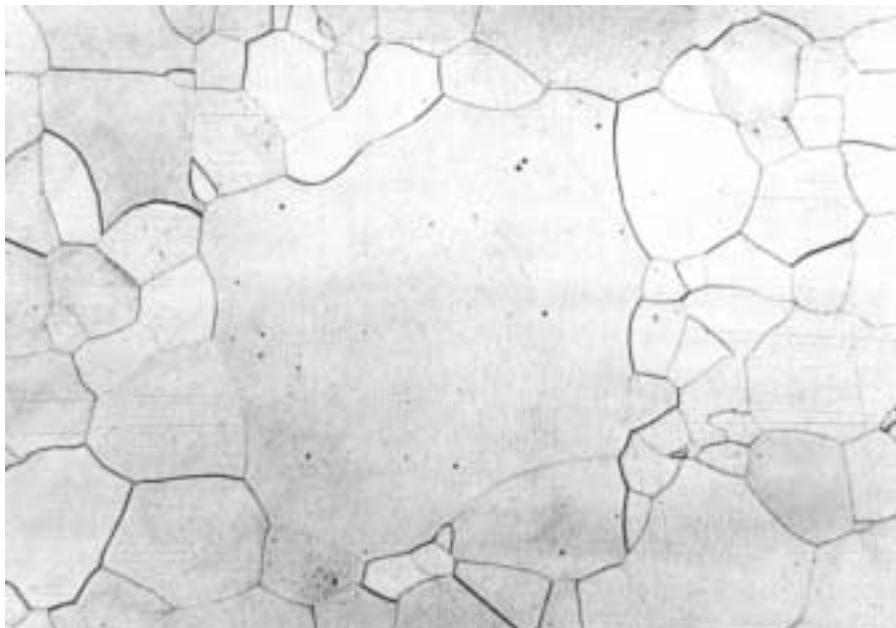
1150°C

croissance anormale (ou « exagérée »)

***au dessus d'une température critique, certains grains se mettent à croître rapidement
(recristallisation secondaire)***



les joints de grains migrent vers le centre de courbure des grains en cours d'absorption



**fer électrolytique
déformé 3%
recuit 112h 540°C**

**la ségrégation d'impuretés ou d'éléments d'addition aux joints de grains peuvent bloquer leur croissance...
(le Nb ralenti la croissance de la taille de grain)**

2) Aciers austénitiques (alliages sans transformations de phases)

Bien qu'il n'y ait pas de transformation de phase, on peut employer les termes d'austénitisation, de trempe et de revenu...

- Austénitisation : chauffage au-dessus de 1000°C (entre 1050 et 1200°C)

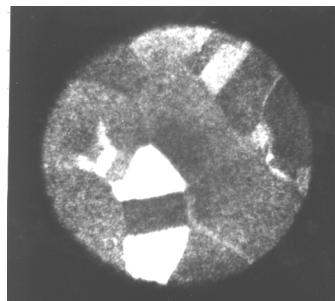
- remise en solution des carbures, borures, nitrides...
- suppression des contraintes résiduelles
- « remise à zéro » de l'acier

- trempe : refroidissement rapide

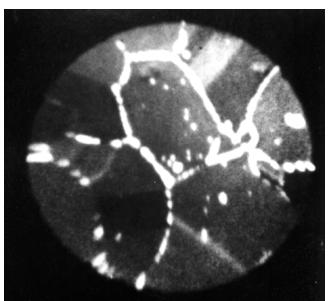
- pas de transformation martensitique
- « fige » la structure obtenue

- revenu (entre 600 et 900°C)

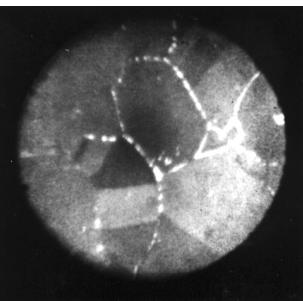
- gère la précipitation du carbone, du bore ...



Ni

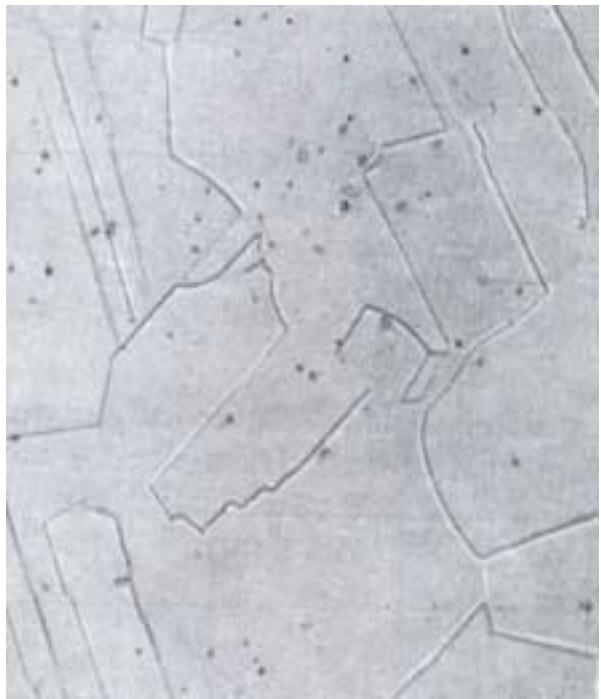


B



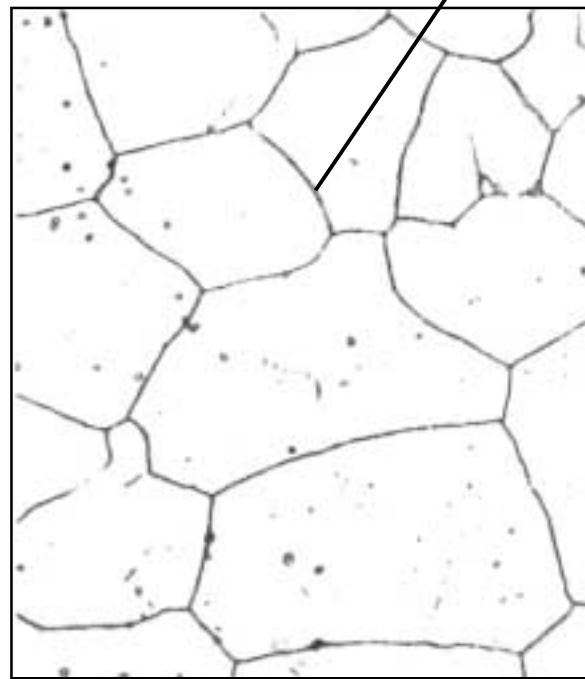
Mo

acier inoxydable austénitique 316
précipitation de borures de molybdène
aux joints de grains
austénitisation 1h 1050°C
revenu 700°C
images ioniques (SIMS)



acier 18-8 (0,06% C)
austénitisé 1050°C
puis trempé
carbone en solution solide

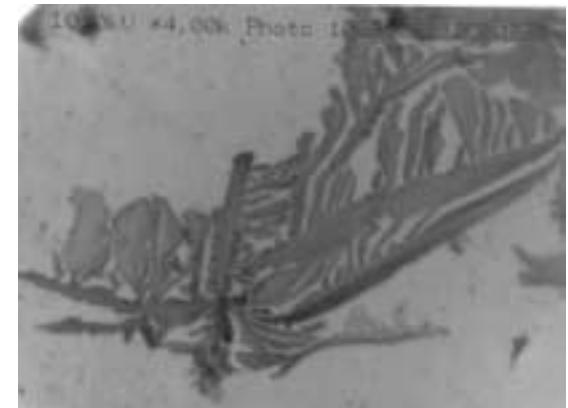
10µm

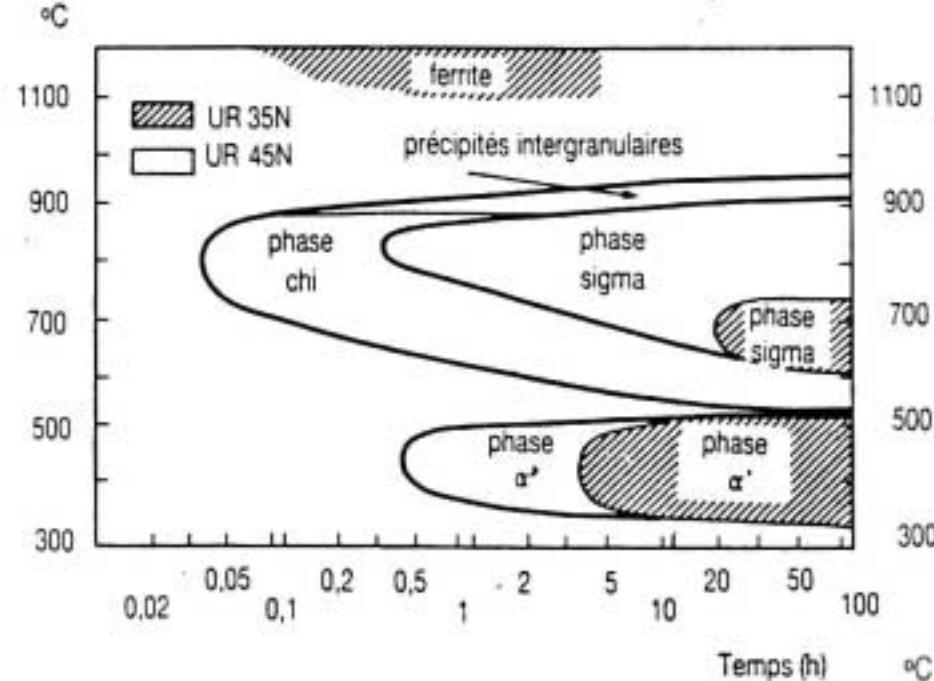


précipitation de carbures dans les joints de grains

acier 18-8 (0,2% C)
austénitisé 1150°C
puis trempé et revenu 600°C – 24h

précipités de carbo-borures de Mo
("fougères")
observation TEM,
réplique d'extraction

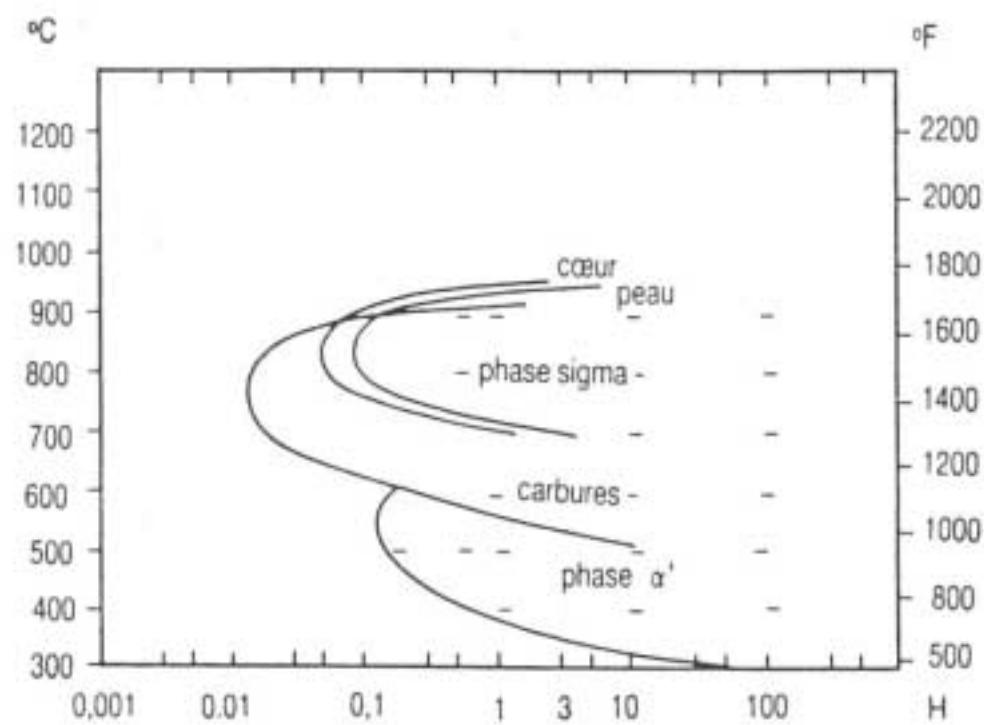




diagrammes TTT pour des alliages austénitiques (base Ni)

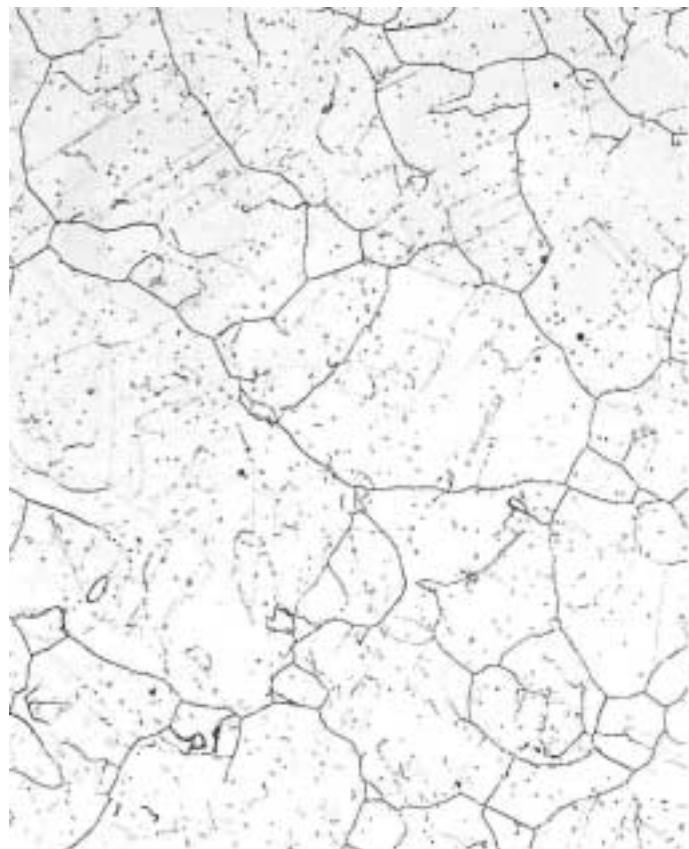
Alliages UR 35N et UR 45N

Alliage UR 52N



Evolution microstructurale d'un acier austénitique 25-20

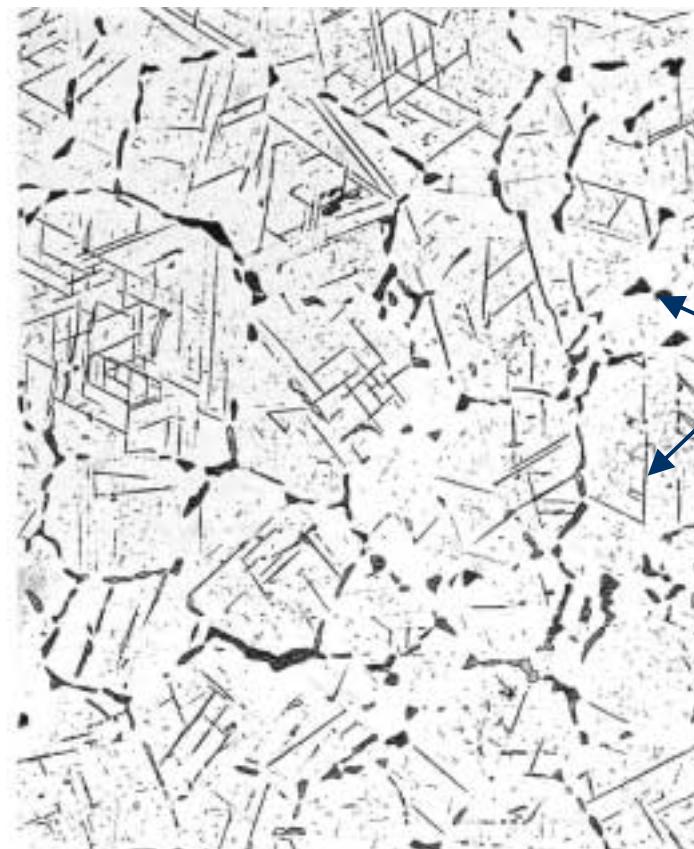
(centrale thermique de Carling)



état de réception

50µm

*fine précipitation de carbures inter
et transgranulaire*



après vieillissement 3000h - 680°C

*précipitation de phases σ aux joints de grains
(nODULES) et dans les grains (aiguilles)*