

Traitements thermiques :

La vitesse de refroidissement joue sur la taille des grains

Structure fine => limite d'élasticité élevée

Fe δ => CC ; Fe γ => CFC ; Fe α => CC

Ferrite : solution solide d'insertion de C dans Fe α – 0.02% (C dans les sites Oh)

Austénite : solution solide d'insertion de C dans Fe γ – 0.77 % (C dans les sites Oh)

Martensite : solution solide d'insertion de C dans Fe α – de 0.50 à 1.50 % (la maille devient quadratique centrée en raison de la position des atomes de C sur les arêtes [0 0 1])

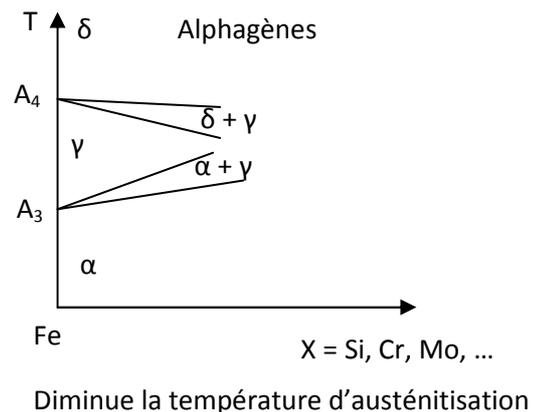
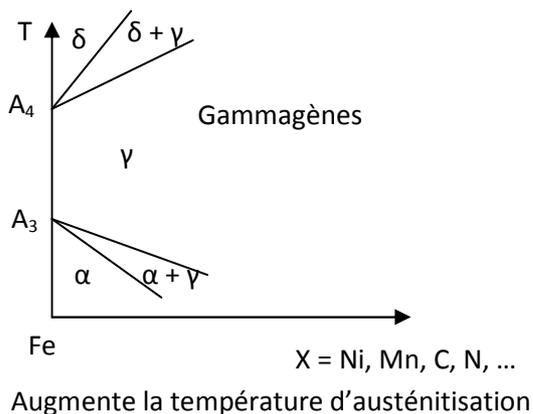
Perlite : Ferrite et cémentite a la composition de l'eutectoïde

Solution solide de substitution :

Règle de Hume-Rothery :

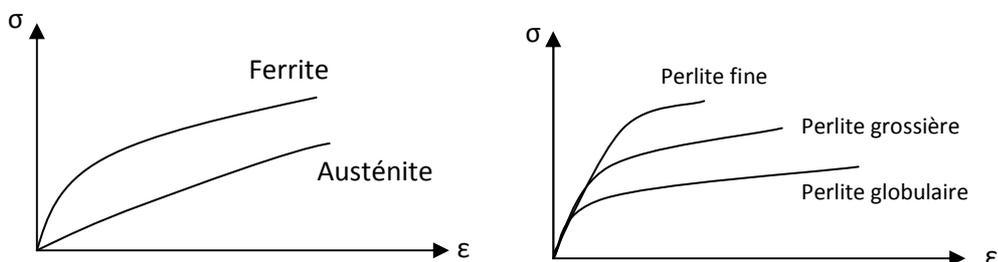
- Miscibilité totale entre 2 atomes A et B
- même structure cristalline
- taille relative des atomes ne diffère pas de plus de 15 %

Loi de Vegard : $a = (1-x) \cdot a_A + x \cdot a_B$



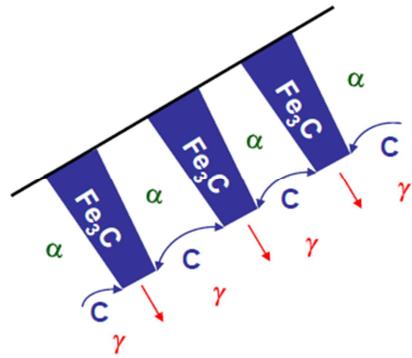
Cémentite Fe₃C : maille orthorhombique

Toutes les transformations démarrent du joint de grain à cause du volume libre plus important.

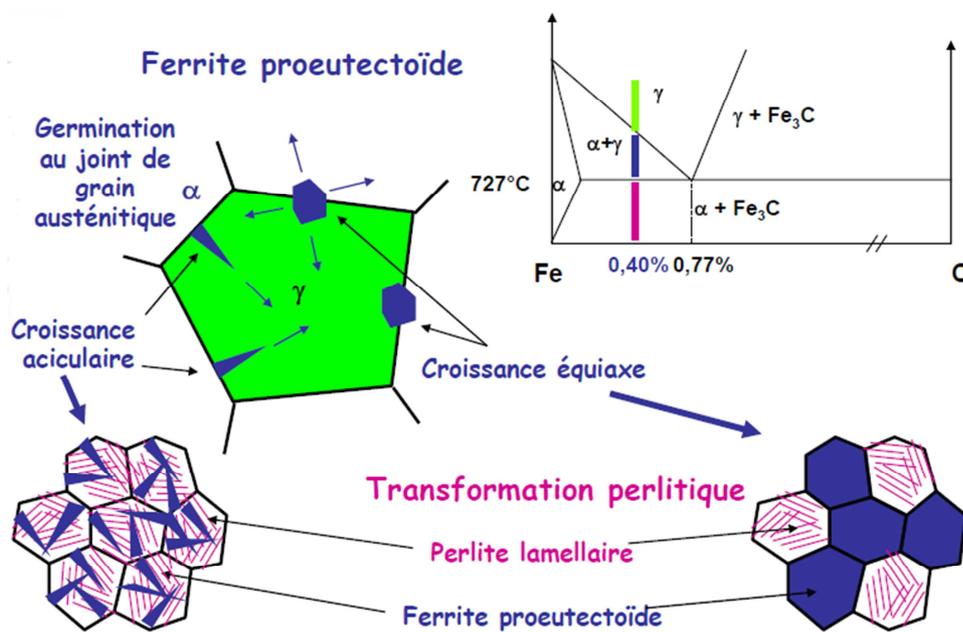


Refroidissement rapide => faible distance de diffusion => fines lamelles.

Transformation perlitique : la germination se fait aux joints de grains austénitiques, avec la diffusion du carbone vers la cémentite.



Aciers hypoeutectoïdes :



Morphologie des grains :

- Refroidissement lent : structure équiaxe (minimise l'énergie de surface)
- Refroidissement rapide : structure aciculaire. Le grain augmente sa surface d'échange avec γ de manière à ce que les flux de carbone soient suffisants pour suivre la transformation.

Aciers hypereutectoïdes :

Morphologie des grains : Perlite lamellaire avec cémentite aux joints de grains austénitique

Transformation martensitique : refroidissement très rapide, transformation quasi instantanée, pas de diffusion (trempe)

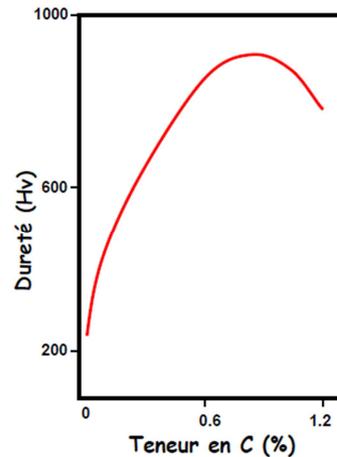
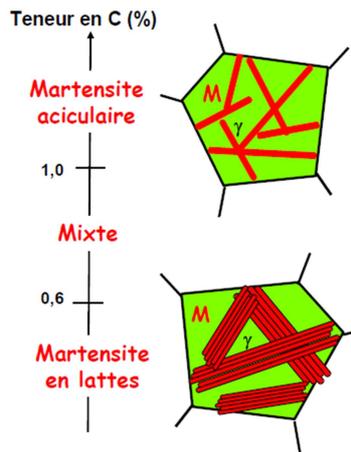
$$\text{Relation de Koistinen : } f_M = 100 \cdot (1 - \exp(-0,011 \cdot (M_s - T) \cdot (1 - \mu)))$$

$$\mu = 0,41 \cdot (1 - \exp(-0,03 \cdot \Delta t^{0,6}))$$

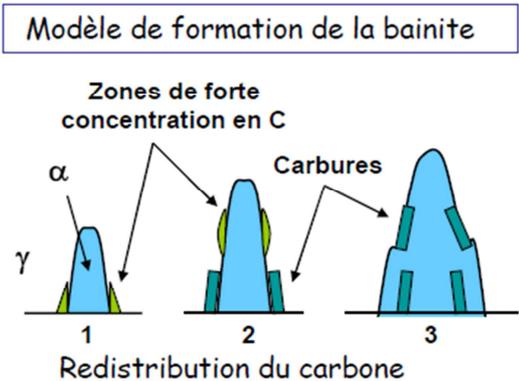
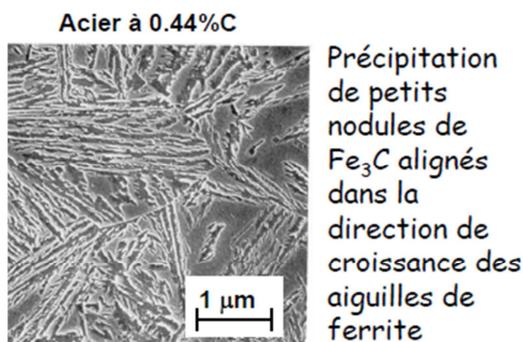
Δt : intervalle de tps pour refroidir de 700°C à 300°C

$$\text{Relation de Roberts : } c/a = 1 + 0,045 (\%C)$$

Influence de la teneur en carbone sur la structure :



Transformation bainitique : maintien isotherme, diffusion à courte distance, formation de bainite (Formation de petits nodules de Fe_3C qui sont alignés dans la direction de croissance des aiguilles de ferrite).



Traitement d'austénitisation : Mise en solution du carbone, étape préliminaire à un traitement thermique. Chauffage pas très rapide jusqu'à une température déterminée suivi d'un maintien plus ou moins long à cette température.

$T > A_{c3}$: Structure 100% γ , les grains grossissent (diminution de l'énergie de surface)

Loi de Hall-Petch : $R_e = R_{e0} + k/\sqrt{d}$

La température d'homogénéisation et la température A_{c3} augmentent avec la vitesse de chauffage.

Le grossissement du grain diminue avec la vitesse de chauffage.

$$m = 8.2^G$$

m : nombre de grains par mm^2

G : indice de grosseur de grain (plus G est grand, plus le grain est fin)

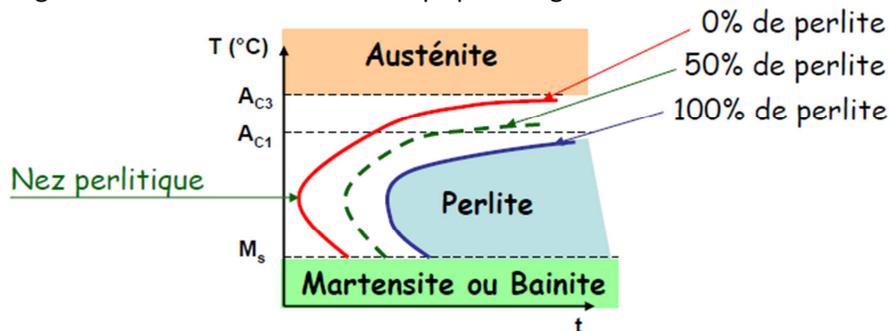
Plus les microstructures sont fines, plus il y a d'obstacles aux dislocations.

Plus les microstructures sont fines, plus il y a de joints de grain (d'interfaces) \Rightarrow plus il y a de sites de germination pour les transformations \Rightarrow plus les températures de début et de fin de transformations sont décalées vers le bas.

Diagramme TTT : Transformation – Température – Temps, déterminé en mesurant la dilatation d'un échantillon au cours d'un maintien isotherme.

Le diagramme qui est borné par A_{C3} est décalé vers le bas et vers la droite si la teneur en élément gammagène augmente (les éléments gammagènes font diminuer A_{C1} et A_{C3}).

$T_{\text{austénitisation}}$ augmente : les grains de γ sont plus gros
 => moins de joints de grains
 => moins de sites de germination pour les transformations qui démarrent donc moins facilement
 => le diagramme est décalé vers des temps plus longs



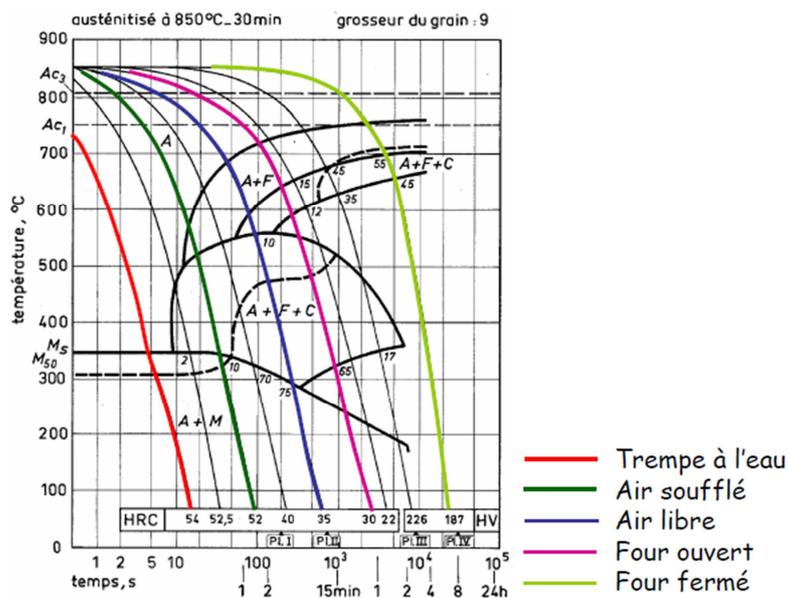
Les éléments alphagènes font augmenter A_{C1} et A_{C3} et font apparaître les deux nez, perlite et bainite.

Diagramme TRC : Transformation Refroidissement Continu

On relève les points de transformation pour chaque vitesse de refroidissement par dilatométrie.

Identification et dosage des phases par microscopie optique électronique à balayage et par diffraction des rayons X.

Si le % de C augmente, A_{C3} diminue et A_{C1} reste constante, M_s diminue.



Trempabilité : aptitude à se transformer par refroidissement rapide en constituants formés à basse température (martensite) et d'éviter la formation de ferrite, perlite et bainite. Facteurs influençant : composition chimique, pureté, conditions d'austénitisation et grosseur de grain.

Si la température d'austénitisation augmente, les grains sont plus gros, et il faut plus de temps pour démarrer la transformation.

Les traitements d'austénitisation + trempe permettent de former les phases hors équilibre. Mais la pièce peut conserver des contraintes résiduelles élevées, liées au quotient thermique et à la transformation de phase. Il faut les diminuer par des traitements thermiques supplémentaires : les revenus (chauffage à une température inférieure à A_{c1}).

Objectifs du revenu : améliorer la déformabilité et la tenacité, relaxer les contraintes.

Coalescence des précipités à fraction volumique constante, les précipités coalescent pour former des plus gros précipités mais moins nombreux => moins d'obstacles au mouvement des dislocations => dureté diminue.

Recuit : Maintien en température relativement longs, vitesse de refroidissement assez faible (gamme de température plus importante que pour le revenu).

Objectif : obtenir un état métallurgique proche de l'équilibre, microstructure homogène, amélioration de la ductilité et de l'usinabilité, réduction des contraintes résiduelles.

Recuit d'homogénéisation : élimination des hétérogénéités chimiques ($T > A_{c1}$).

Recuit de normalisation : traitement d'austénitisation avant trempe, grains ferritiques fins, faible espacement interlamellaire ($T > A_{c1}$).

Recuit complet : obtenir une ductilité élevée mais avec une dureté et une résistance faible.

Obtention de ferrite et perlite grossière ($T > A_{c1}$).

Recuit de régénération : affinement du grain (pièce forgées, moulées, joints soudés, austénitisation trop élevée) ($T > A_{c1}$).

Recuit de globulisation : augmenter la capacité de déformation par coalescence de la cémentite (s'applique à la perlite) ($T < A_{c1}$).

Recuit de restauration : annihilation partielle des lacunes et dislocations, restaurer en partie les propriétés physiques et mécaniques, sans modification apparente de la structure ($T < A_{c1}$).

Recuit de recristallisation : structure écrouie remplacée par une nouvelle structure, germination croissance des grains ($T < A_{c1}$).

Recuit de détensionnement : élimination des contraintes résiduelles, maintien des propriétés mécaniques ($T < A_{c1}$).

Restauration : élimination des dislocations redondantes par annihilation, à plus haute température polygonalisation, augmentation de la taille des blocs de polygonalisation.

Paramètres importants : taux d'érouissage, température de la déformation plastique, température de recuit, nature du métal, impuretés.

Recristallisation : développement de nouveaux grains (pauvres en dislocations) aux dépens de grains écrouis.

Différents stades : recristallisation primaire (formation de nouveaux grains à partir de la structure écrouie), croissance normale des grains (poursuite de la recristallisation primaire après consommation du métal écroui), croissance anormale (recristallisation secondaire, quelques grains croissent aux dépens des autres).

Energie motrice : énergie d'écrouissage.

Cinétique de recristallisation de type Avrami : $V = 1 - \exp(-B.t^n)$.