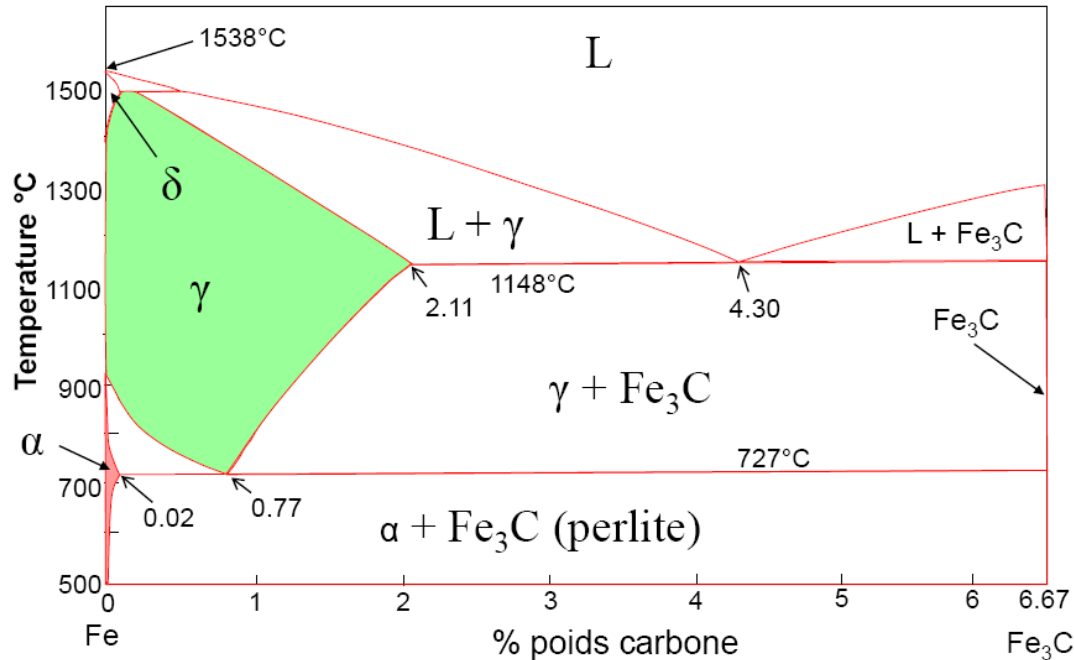
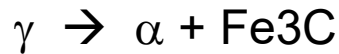


Les métaux pour le GC
mercredi 14 Mai 2025

La transformation martensitique
L'essai de trempe en bout (essai Jominy)
Mise en forme des aciers d'armature nervurés

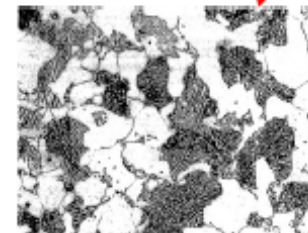
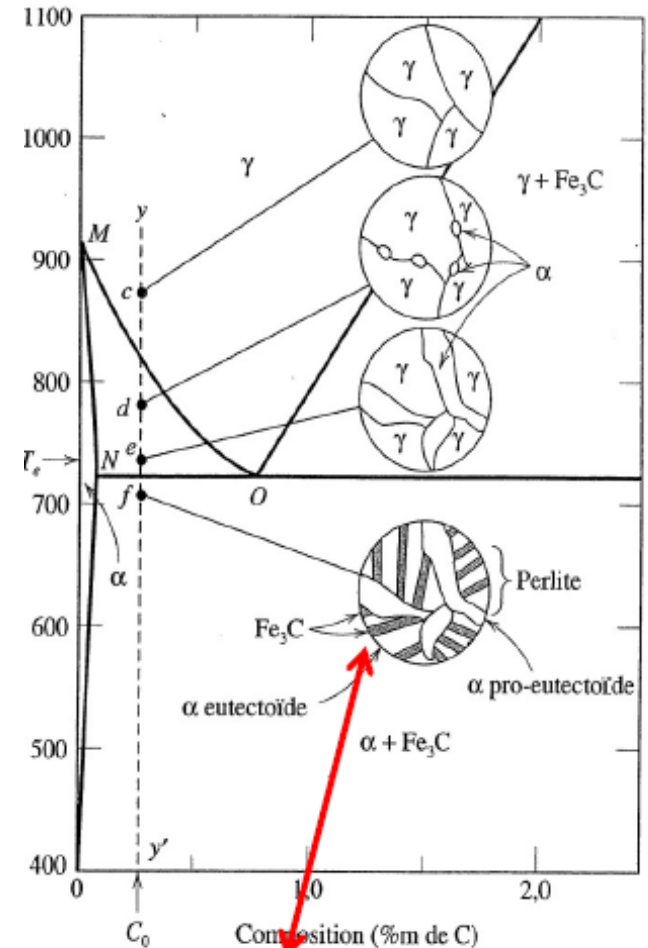
La transformation perlitique

La transformation perlitique est une transformation diffusive à l'état solide.



Microstructure d'un acier perlitique à 0.4 wtpct C:
fraction massique de ferrite pro-eutectoïde = 50%
fraction massique de perlite = 50%

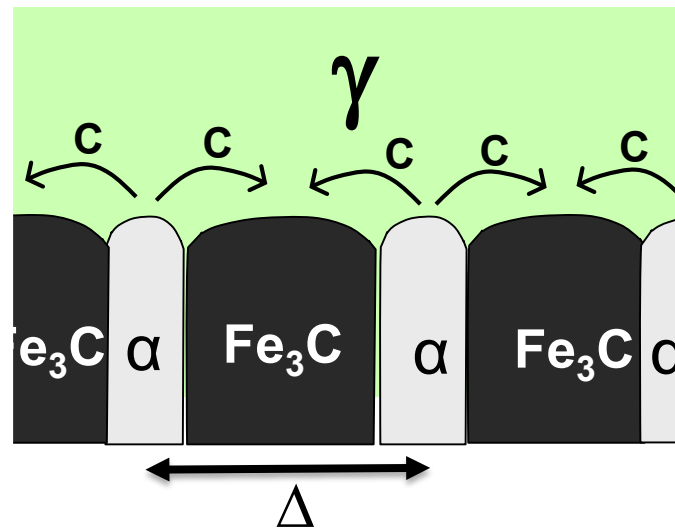
La perlite est faite de 89% en masse de ferrite eutectoïde et 11% en masse de cémentite Fe₃C.



Effet de la vitesse de refroidissement: apparition de martensite

Refroidissement lent : transformation perlitique par germination (sur les jdg de γ) et croissance coopérative par diffusion de C (**diffusion** = mouvement des atomes C dans l'austénite pour venir «nourrir» la cémentite Fe_3C).

Plus la taille des ilots de perlite, d , et l'espace interlamellaire de la perlite, Δ , sont petits, plus la limite élastique est élevée (**durcissement composite avec une phase ductile, la ferrite, et une phase dure, Fe_3C**)



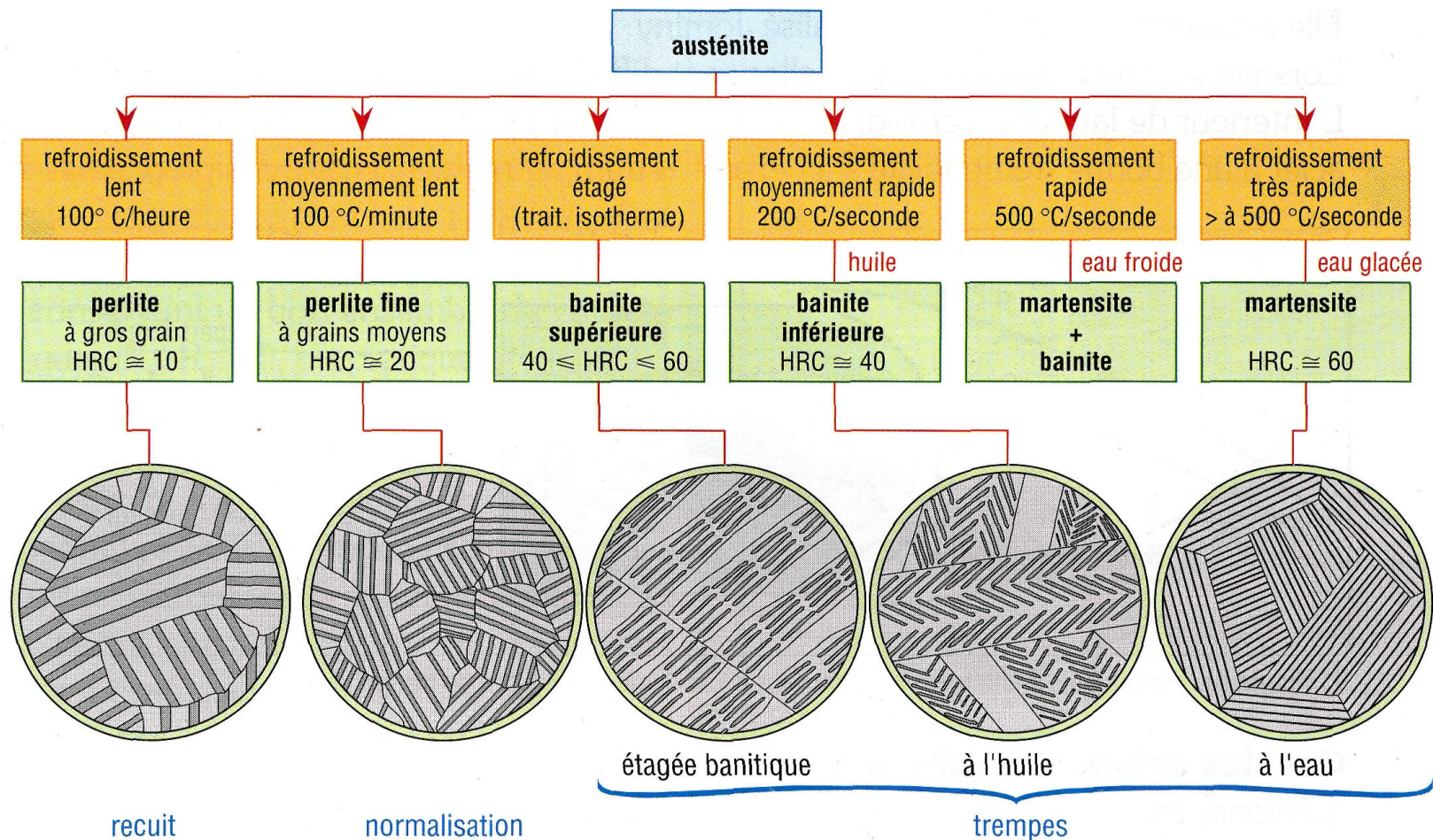
Pour diminuer d et Δ , **on augmente la vitesse de refroidissement ...**

Quand cette dernière atteint une certaine valeur, **la transformation martensitique** remplace la transformation perlitique.

Effet de la vitesse de refroidissement: apparition de martensite

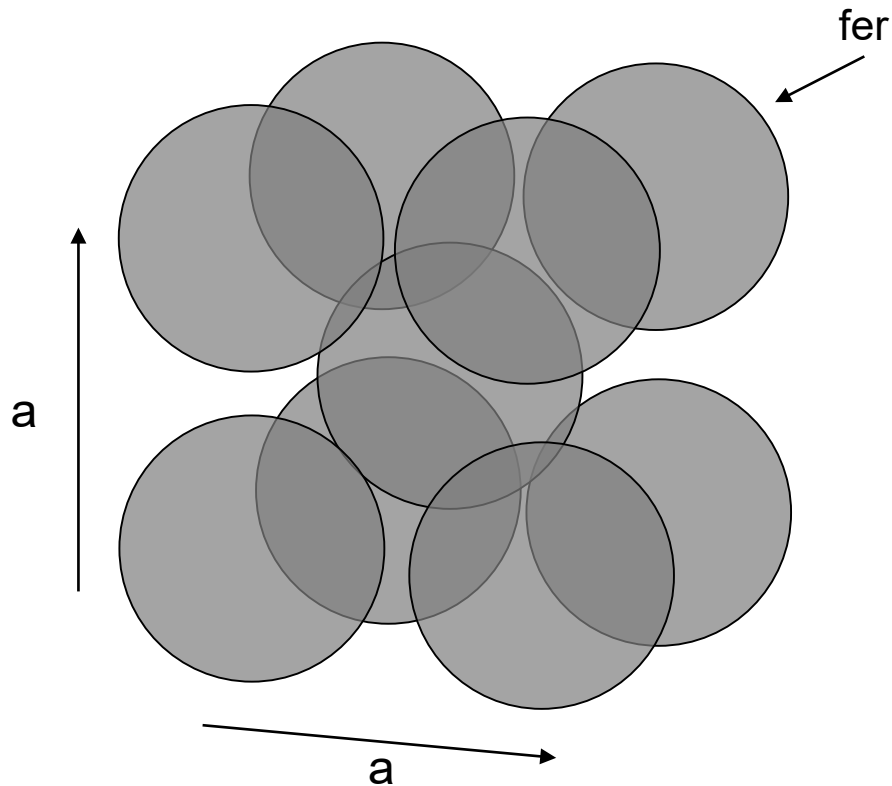
Quand la vitesse de refroidissement atteint une certaine valeur, la **transformation martensitique** remplace graduellement la transformation perlitique.

Exemple du refroidissement d'un acier eutectoïde Fe-0.77%pdsC
(http://www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/Metaux_Ferreux.htm)

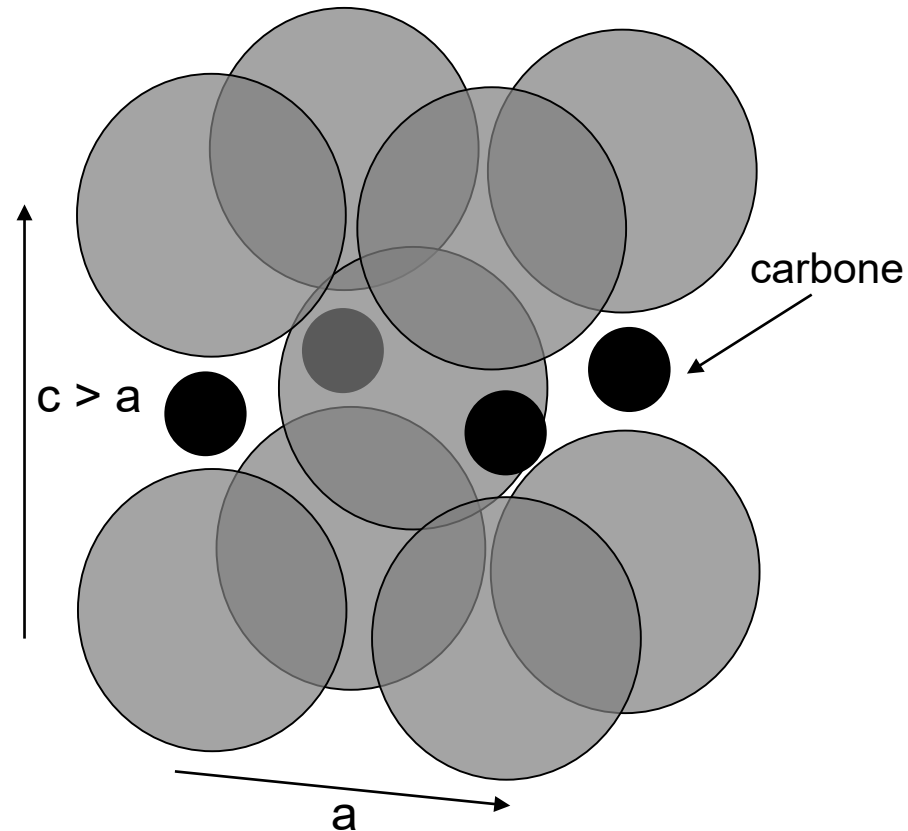


La martensite

La ferrite α (cubique centré, $a=b=c$) “s’allonge” pour accommoder plus de C et la maille devient tétragonale ($c > a=b$); **la martensite α'** est une **phase métastable** qui n’apparaît pas sur les diag. de phases. On dit que la martensite est de la « **presque ferrite** » qui est « **forcée** » d’accepter plus de C ...



Maille cubique centré de la ferrite α

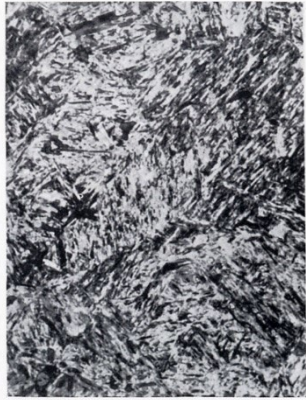


Maille tétragonale centré de la martensite α'

La phase α' est une **solution solide d'insertion sursaturée en C** dans le fer α de même composition que l'austénite initiale (on « force » la ferrite à accepter plus de C).

Le diagramme Fe-C: la transformation martensitique

Martensite: phase allongée en forme d'ellipses aplaties (aiguilles ou lattes), la structure est dite aciculaire (aiguilles)



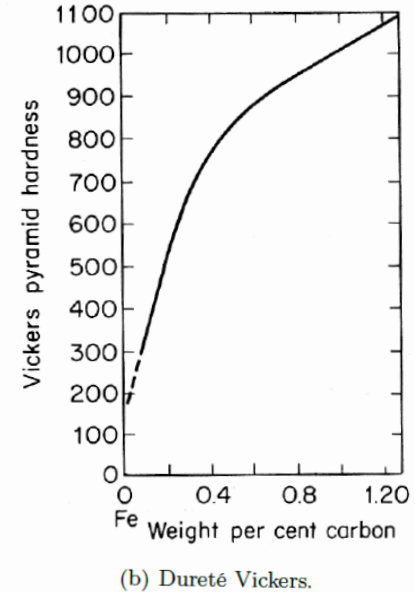
0.7% C,
0.2 Si, 0.25% Mn



0.85% C



0.85% C,
0.2 Si, 0.2% Mn

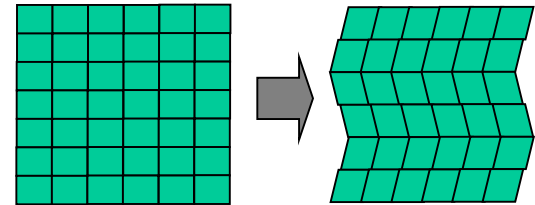


La martensite possède une (trop) grande dureté ($HV > 800$) mais elle est fragile.

Le réseau du fer est fortement distordu; ceci durcit l'acier en bloquant les dislocations.

Un revenu adoucissant vers 200-600°C permet :

- 1- d'abaisser la dureté
- 2- de redonner un peu de ductilité et de ténacité
- 3- et de détensionner la structure.



apparition de **contraintes internes associées** au changement de volume

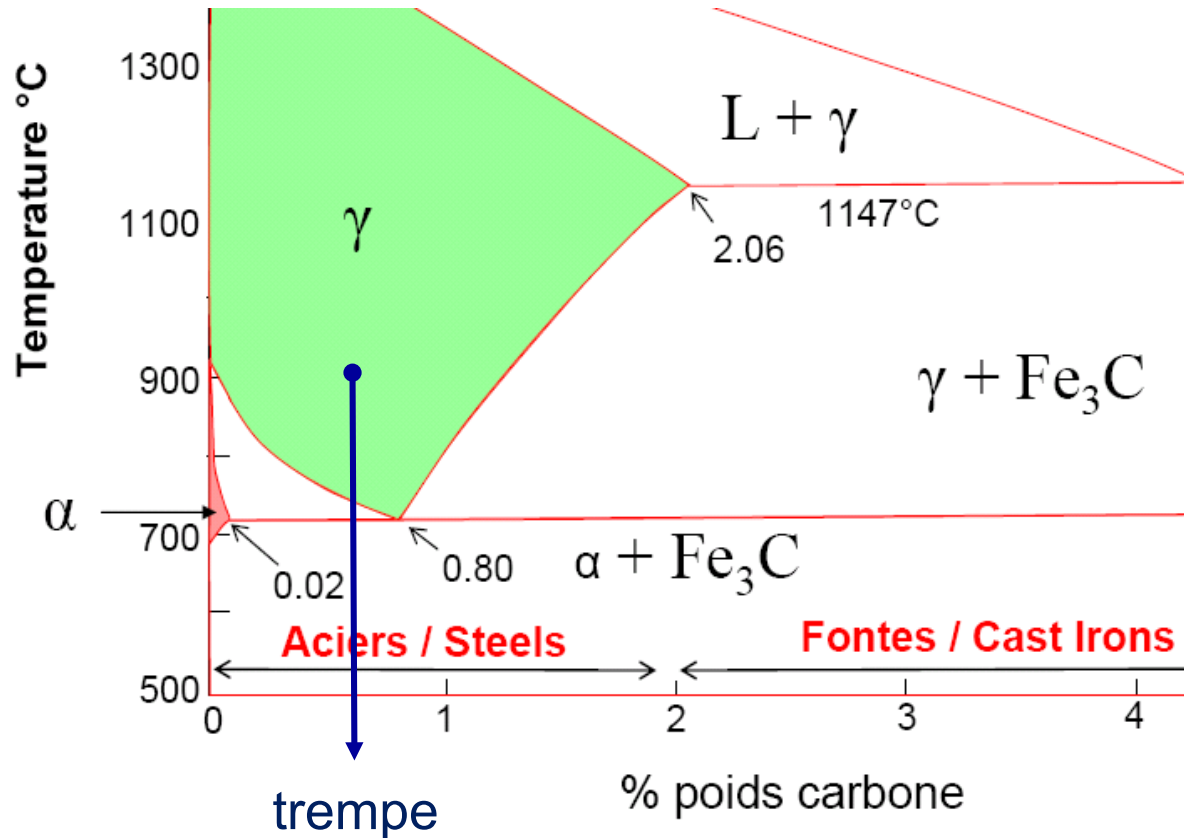
On parle alors de « **martensite revenue** ».

Le diagramme Fe-C: la transformation martensitique

La martensite α' se forme non par diffusion de C mais par un faible déplacement de Fe pour accommoder les C : **la transformation est dite displacive ou « militaire »**.

Les **aciers martensitiques** sont assez chers car ils requièrent un **TT (traitement thermique)** spécifique fait en 3 étapes:

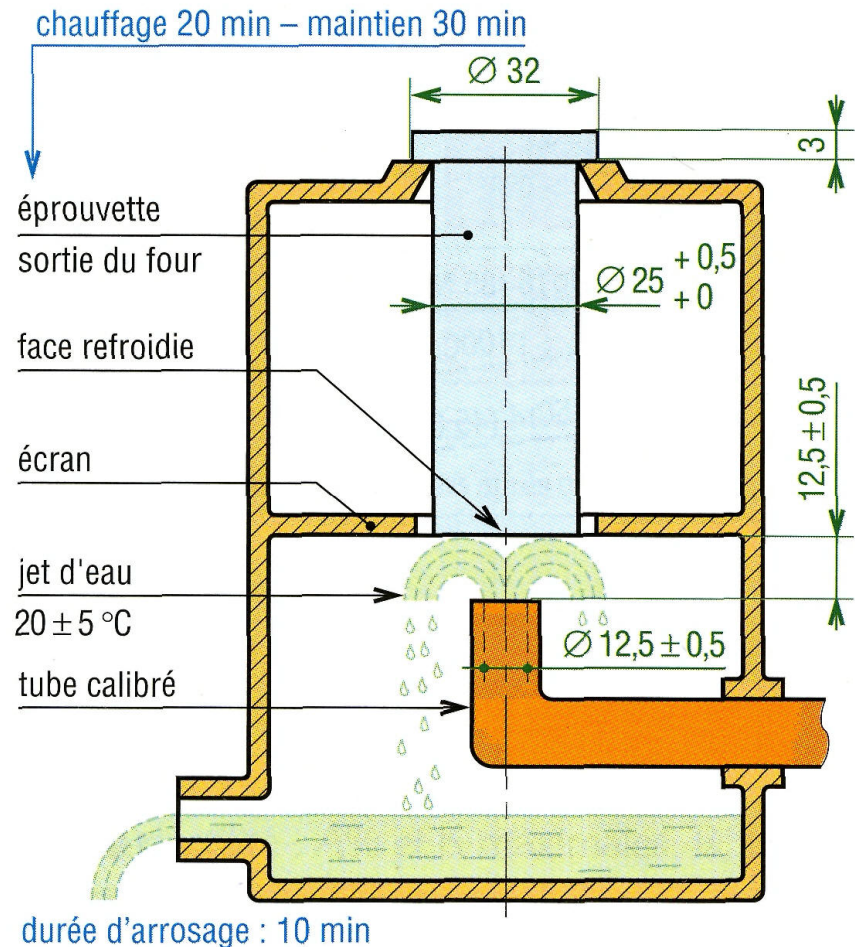
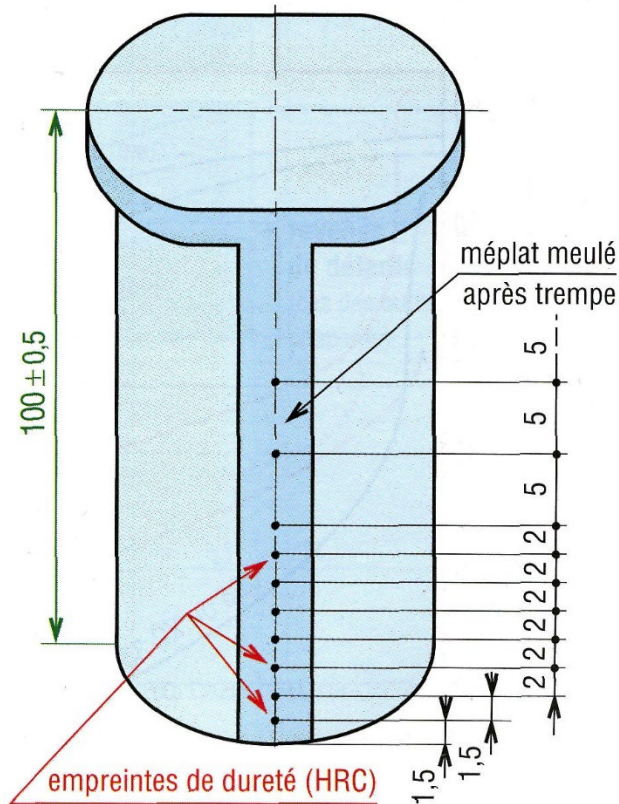
1. **Austénitisation** = « placer » l'alliage Fe-C dans le domaine 100% γ vers $\sim 900^\circ\text{C}$
2. **Trempe**, les atomes de C ne pouvant diffuser par manque de temps, la martensite se forme
3. **Revenu adoucissant** (martensite revenue) avec détensionnement vers $200\text{-}600^\circ\text{C}$.



Essai Jominy ou essai de « trempe en bout »

Une pièce cylindrique est **austénitisée** dans un four puis sortie et fixée dans un montage de trempe. L'extrémité du cylindre est aspergée d'eau. Le refroidissement, violent en surface, s'atténue quand on s'éloigne de la surface inférieure du cylindre.

Un gradient de vitesse de refroidissement s'installe dans le cylindre.

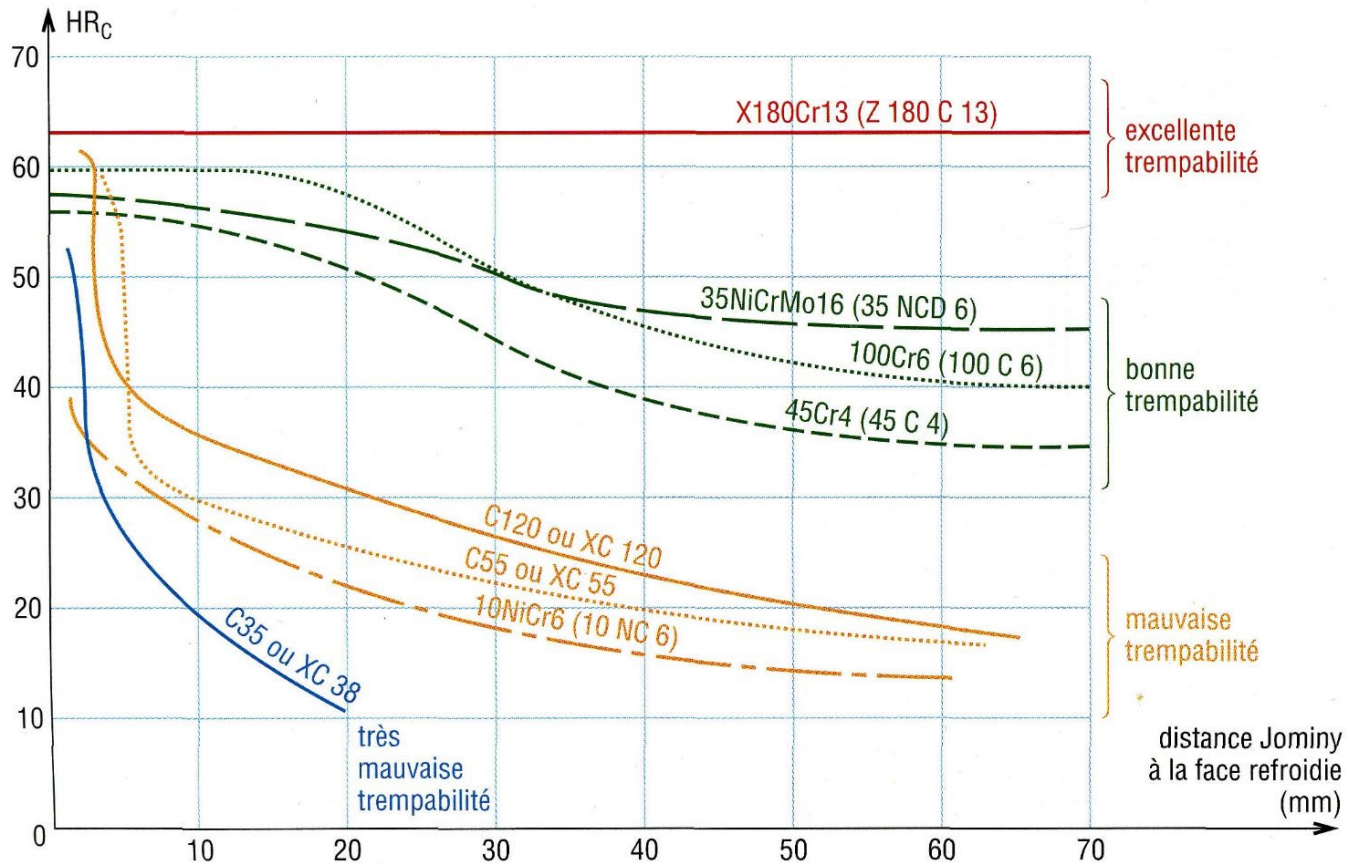


Essai Jominy ou trempe en bout

Après la trempe en bout, on fait un **profil de dureté appelé courbe Jominy** sur un méplat du cylindre.

Les **aciers trempables** montrent une dureté élevée (grâce à la martensite) sur une longue distance. Pour obtenir une telle trempabilité, on ajoute des éléments d'alliage.

Les aciers peu ou pas trempable montrent une dureté qui décroît très vite.



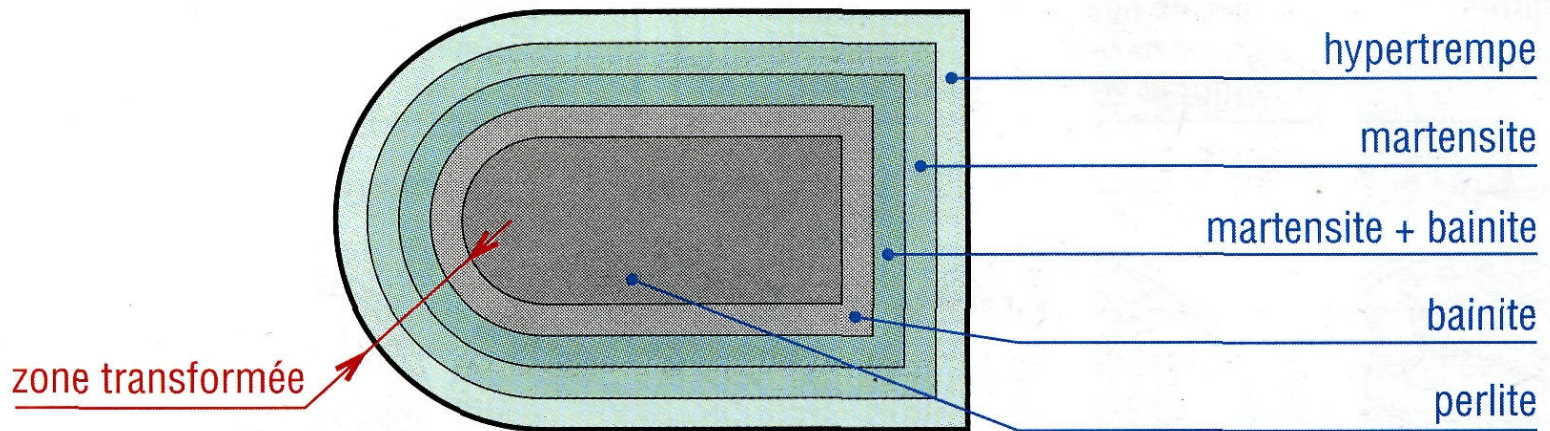
Courbes Jominy de différents aciers alliés

Trempe martensitique sur pièce massive

Dans la pratique, les pièces massives sont difficiles à refroidir rapidement dans leur totalité. L'intérieur de la pièce est refroidi en dernier et plus lentement: il est plus difficile à tremper.

Un acier a **une bonne trempabilité** s'il permet la formation de martensite même à cœur de pièces massives.

Avec un acier de faible trempabilité, on obtient une pièce présentant un gradient de microstructures (martensite en peau et perlite à cœur) et donc un gradient de dureté et de limite élastique.



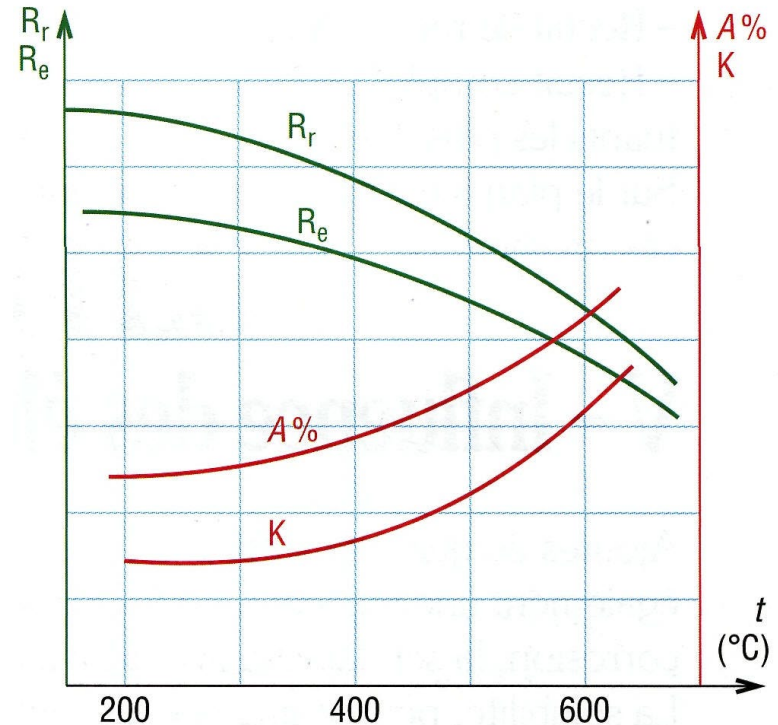
Pièce brute de trempe présentant un gradient de phases: le cœur refroidi lentement est en perlite.

Aciers martensitiques

Applications particulières: pièces mécaniques, lames de rasoir, de couteau, aciers inox ... Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile et **peu tenace** pour être utilisé directement. Il nécessite toujours un revenu. Lors du soudage, il peut se former de la martensite proche du cordon.

Grâce aux **transformations de phase à l'état solide**, les aciers sont des alliages particulièrement **flexibles**. On peut modifier leurs propriétés mécaniques en jouant sur :

- le contenu en carbone
- la vitesse de refroidissement (perlite ou martensite)
- le revenu de détente/adoucissement
- l'addition d'éléments d'alliage qui modifient les diagrammes de phases, **éléments alphagènes** (Si, Mo, Cr, V, W, Ti, Nb, S, ...) ou **gammagènes** (Ni, Mn, N,...)
- et la taille des microstructures (taille de grains, espacement perlitique)

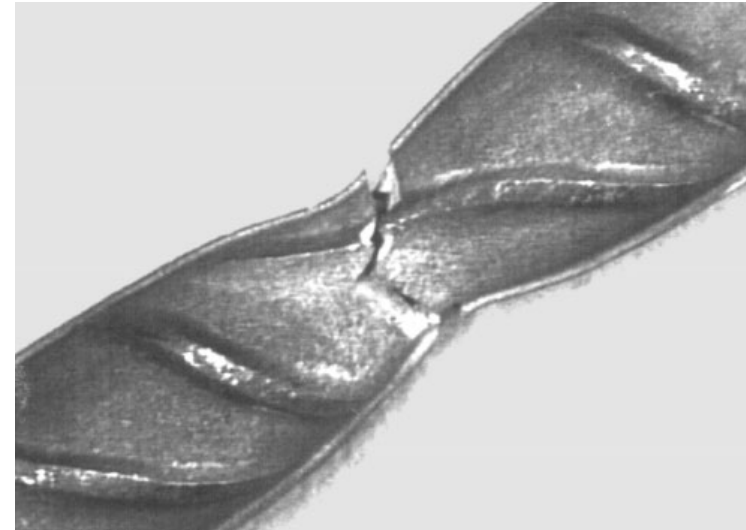


Effets de la température de revenu sur un acier trempé: R_e = limite élastique, R_r = limite à rupture, A = ductilité et K = ténacité.

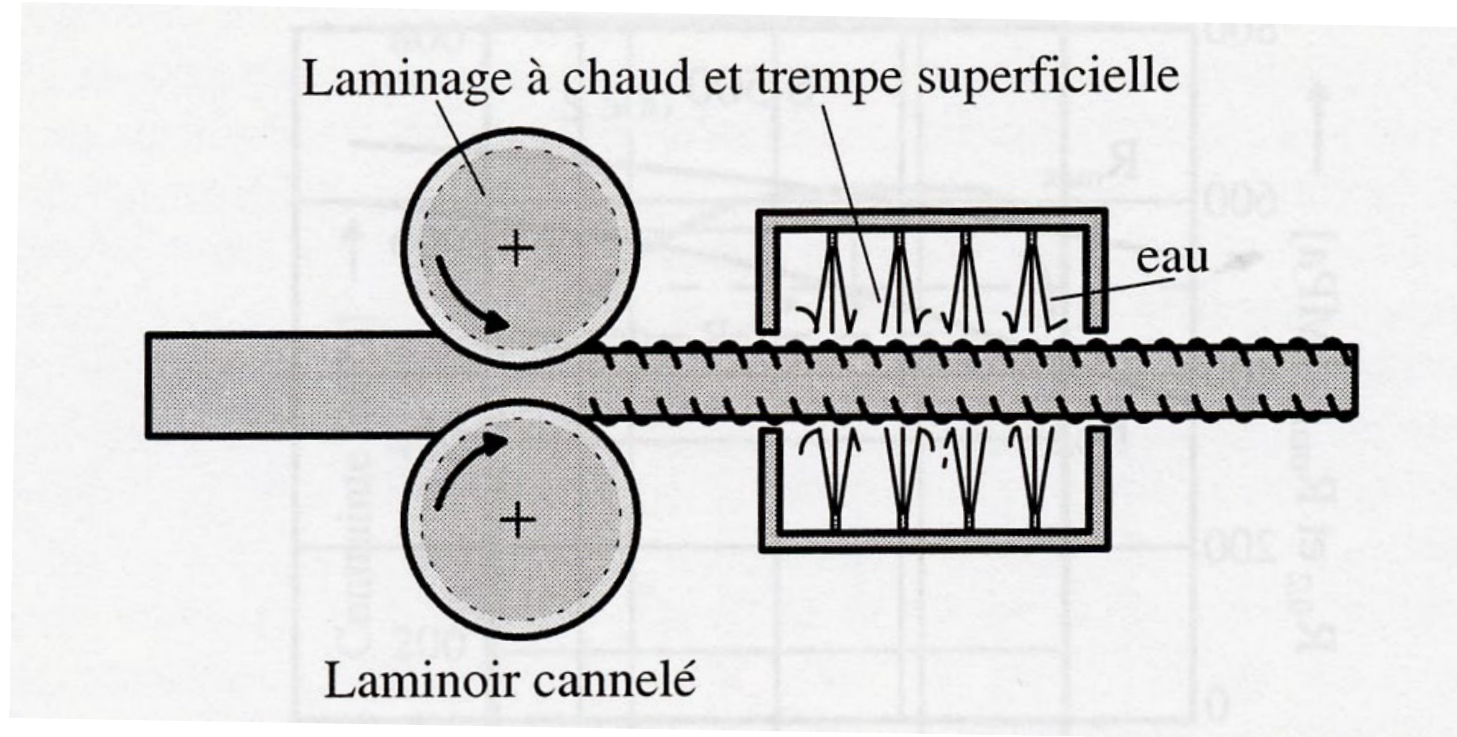
Combinaison production et durcissement: cas de la mise en forme des aciers d'armature

Pour les aciers d'armature, on souhaite:

- Une **limite d'élasticité fiable** – essentielle pour le dimensionnement de l'armature
- Une **bonne résistance à la fatigue** – constructions souvent soumises à des sollicitations cycliques (ponts)
- Une **bonne soudabilité** – pour la réalisation d'assemblages et de connections résistants
- Une **bonne aptitude au pliage à froid** – pour faciliter la mise en place sur le chantier. Les barres doivent suivre la direction des contraintes de traction principales.
- Une **bonne adhérence dans le béton** – les barres sont nervurées et les nervures doivent présenter une forte limite élastique.



Combinaison production et durcissement: cas de la mise en forme des aciers d'armature



Le laminage se fait à chaud à T proche de 950°C : **l'acier est austénitique.**

Lors de la dernière passe, le laminage crée des nervures en surface et la peau de la barre nervurée est trempée par des jets d'eaux dans une cage. Ensuite la barre refroidit à l'air libre.

Combinaison production et durcissement: cas de la mise en forme des aciers d'armature

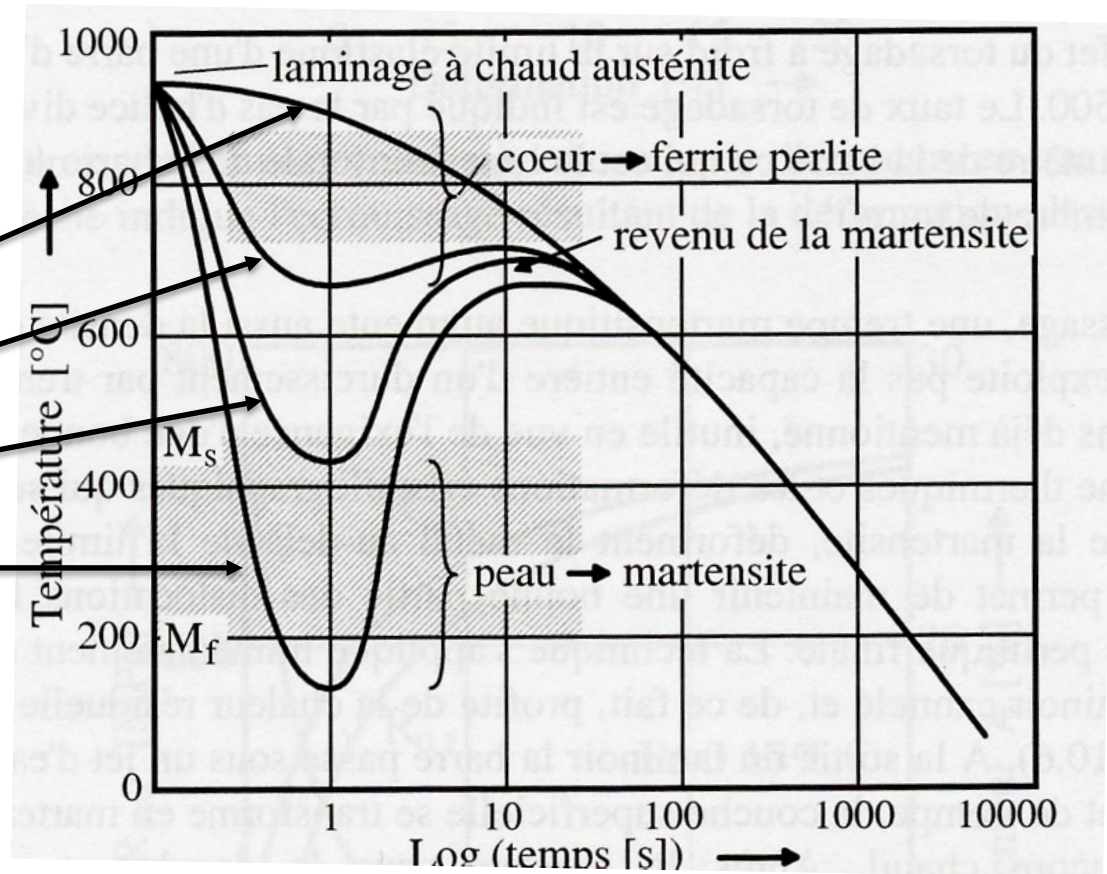
Pour une barre
cylindrique de
rayon R :

$r = 0$

$r = R/2$

$r = 3R/4$

$r = R$



De fait, l'acier subit un TT (traitement thermique) qui crée un gradient d'histoires thermiques entre cœur et peau et donc **un acier à gradient de structure**, donc de propriétés mécaniques, entre cœur ductile (ferrite-perlite) et peau durcie. La martensite est revenue par le réchauffage après la cage d'eau.

Résumé: les aciers de construction

contrainte

martensite

martensite
revenue

Ferrite + perlite lamellaire
(acier ferrito-perlitique)

Ferrite + perlite
granulaire

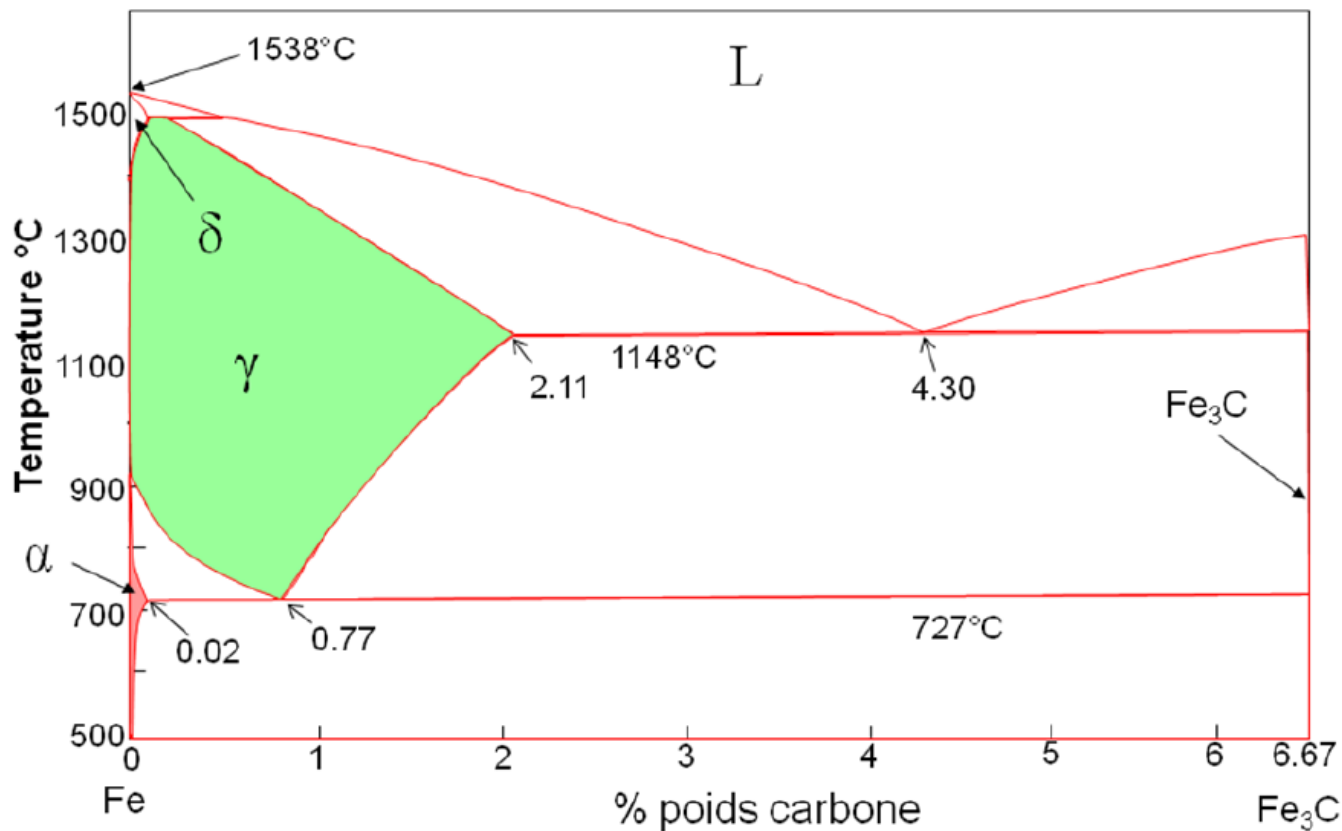
Aciers de
construction avec
ductilité pour
absorber des
déformations
(ouragan,
tremblement de
terre, etc ...)



déformation

Exo 7:

- 1- Quelle concentration en C doit avoir un acier de construction (acier hypoeutectoïde avec $C < 0.77$ pdsC) pour qu'il ait une fraction massique de perlite de 70% ?
- 2- Quelle est la fraction massique globale de cémentite à 727°C - ε ?
- 3- Quelle est la fraction massique globale de cémentite à 20°C dans cet acier en supposant que la ferrite est alors du fer pur ?



19 Mai: Les modes de durcissement