

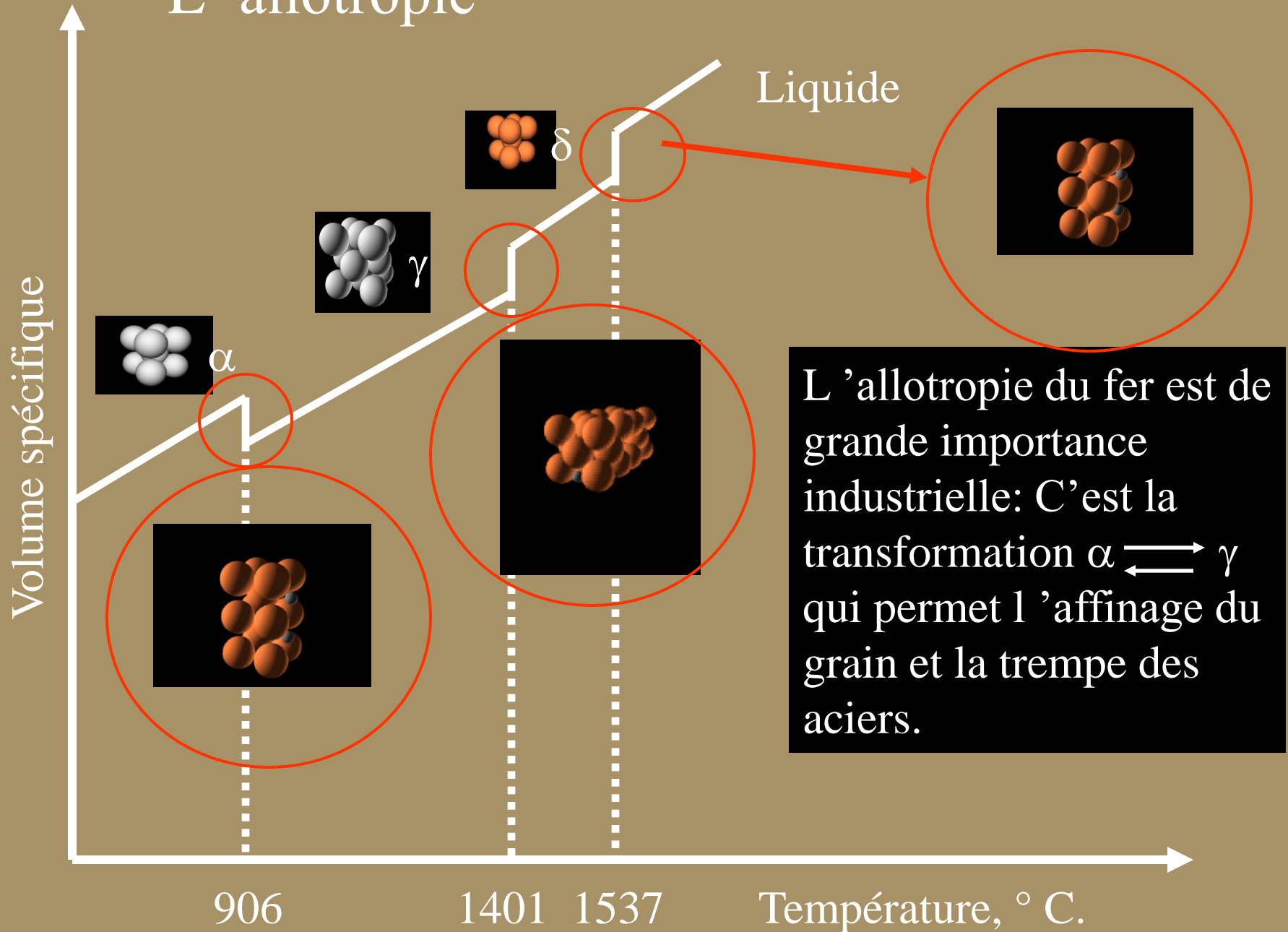
Diagramme d'équilibre

- Identifications des lignes et des zones

- **Le phénomène de la modification du réseau cristallin sous l'effet de la température porte le nom de transformation allotropique**

- Ces transformations sont établies grâce **aux paliers thermiques des courbes de refroidissement ou de chauffage.**
- Les courbes de chauffage ou de refroidissement du fer sont caractérisées par **plusieurs points d'arrêt** (point critique ou palier) correspondant à des températures définies pour des transformations déterminées.
- Respectivement $\sim 906^{\circ}\text{C}$, $\sim 1401^{\circ}\text{C}$, $\sim 1537^{\circ}\text{C}$ (ces valeurs peuvent varier légèrement en fonction de chauffage ou de refroidissement)

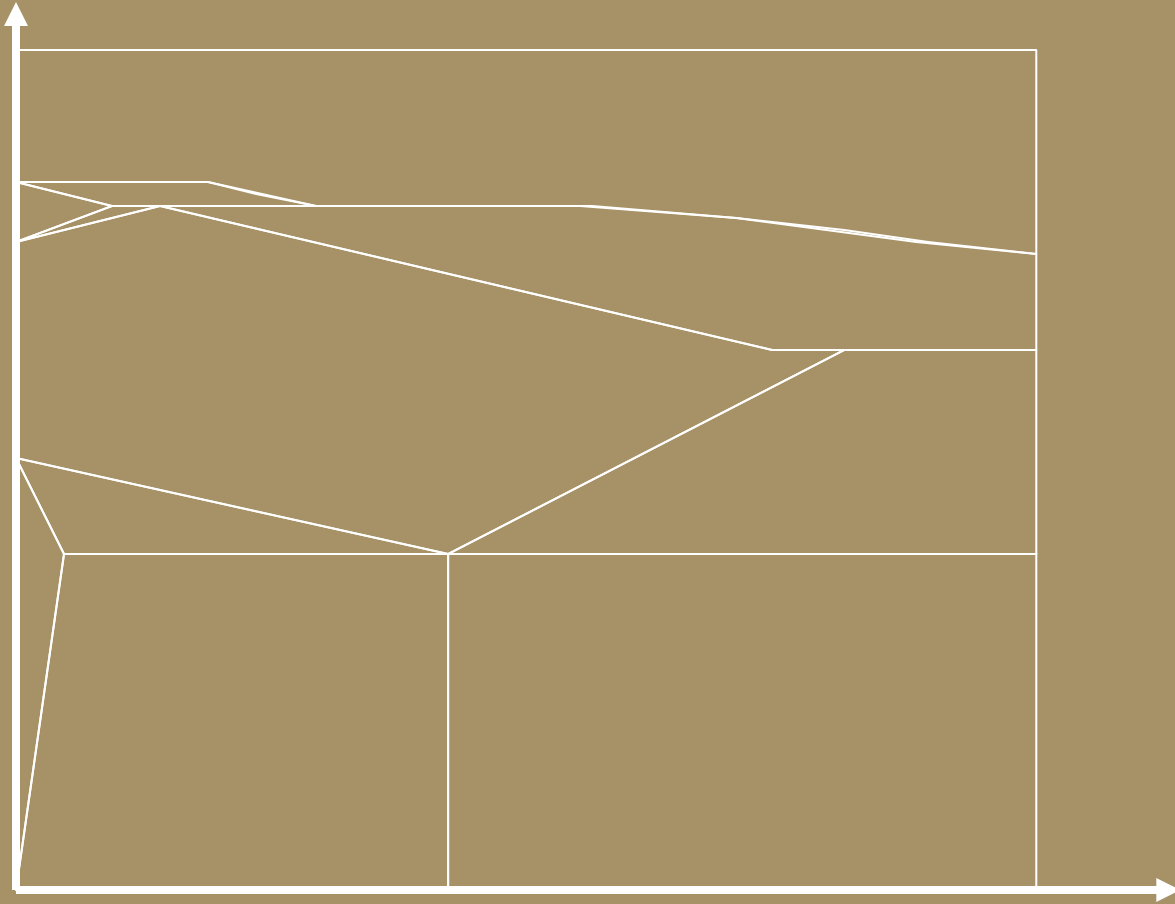
L'allotropie

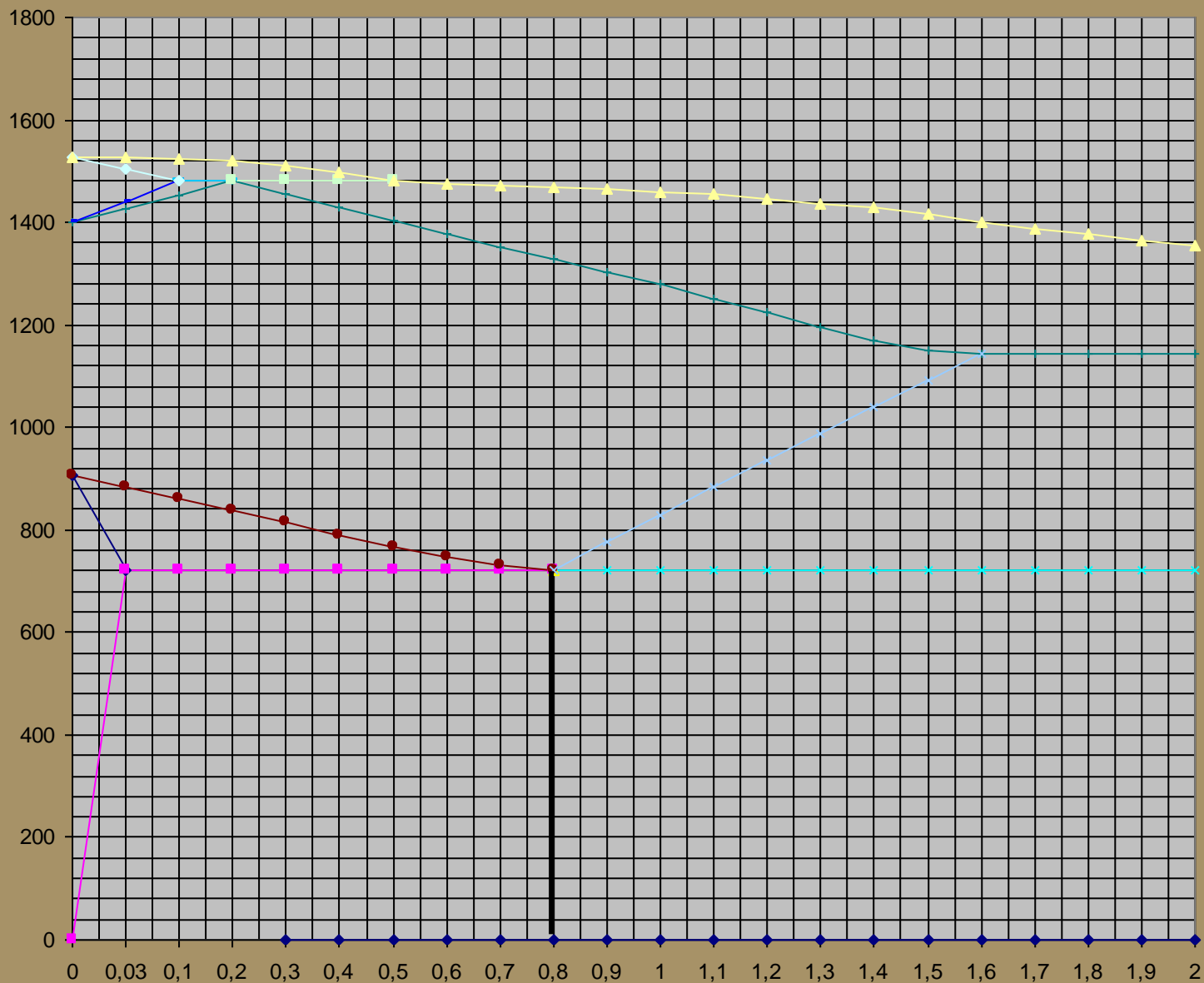


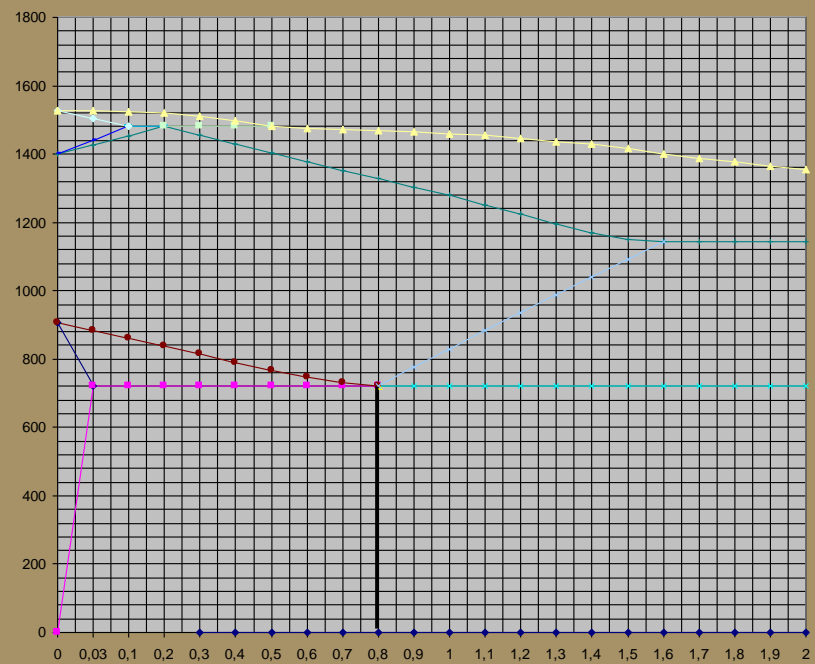
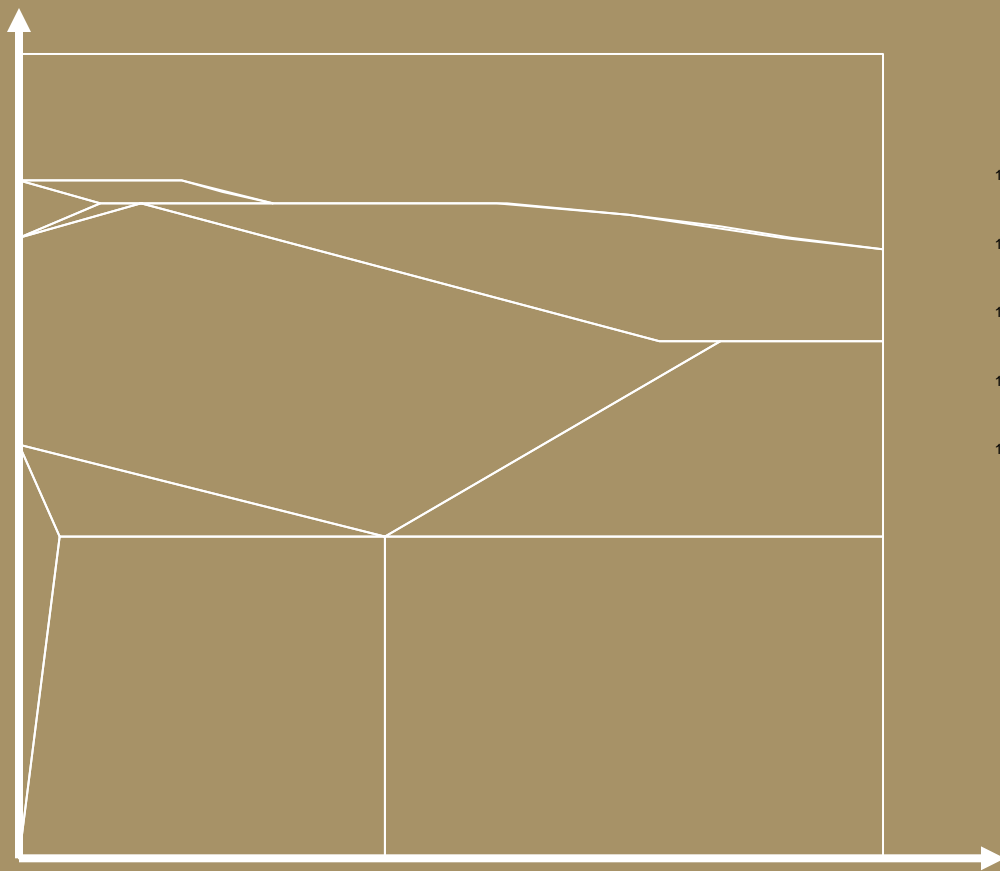
L'allotropie du fer est de grande importance industrielle: C'est la transformation $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ qui permet l'affinage du grain et la trempe des aciers.

Le diagramme d'équilibre Fer-Carbone

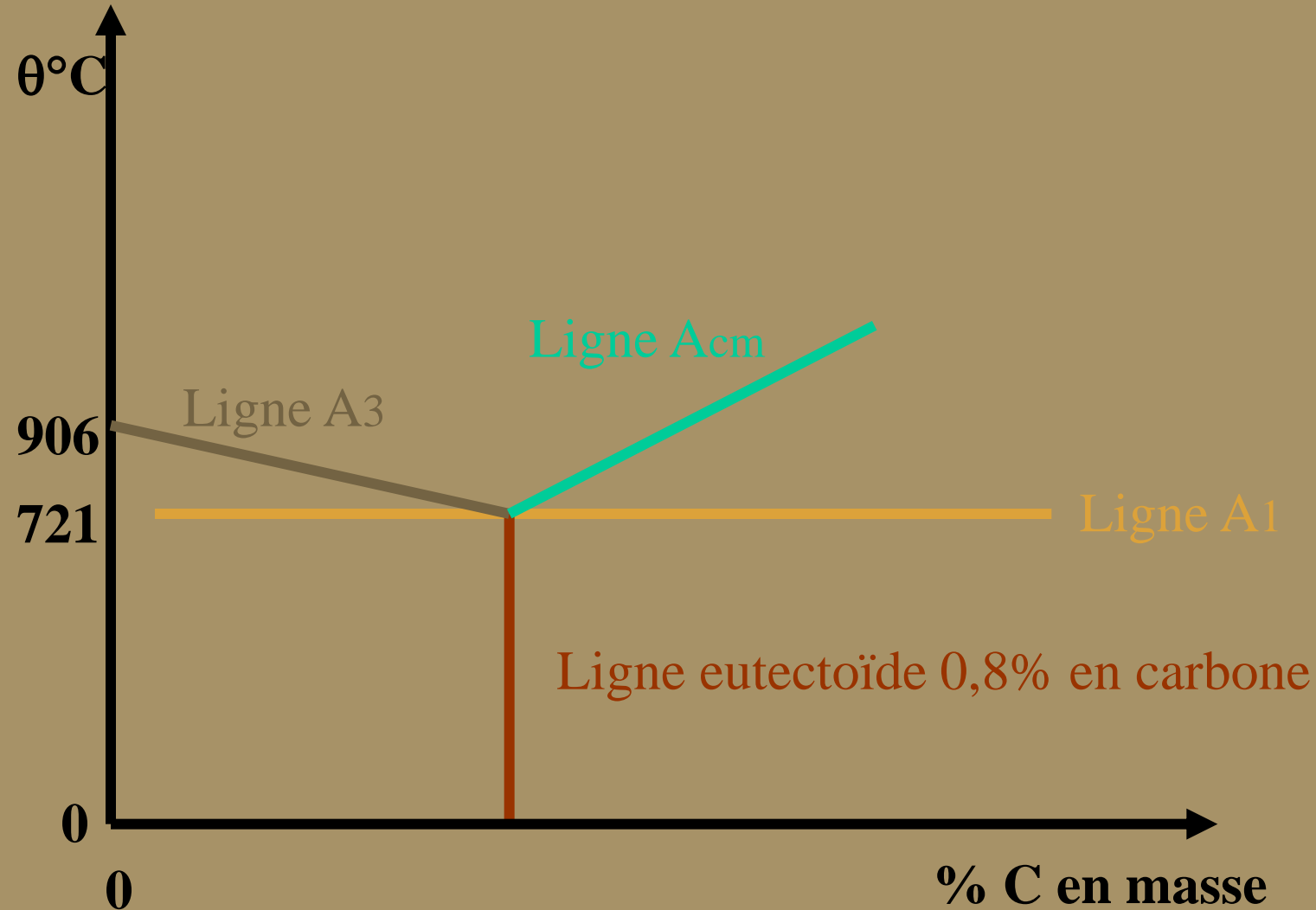
Définition des différentes zones du diagramme.







Identifiez les différentes lignes



Ferrite (fer 0,026%)

Austénite (0% à 2,05%)

Fer delta (0% à 1%)

Aciers hypoeutectoides 0,026 à 0,79% en C (Ferrite + perlite)

Aciers eutectoides 0,8% en C (perlite seulement)

Aciers hypereutectoides 0,81 à 1,7% en C (perlite+ cémentite)

Zone de transformation

γ + cémentite

γ + δ

δ + Liquidus

γ + Liquidus

$\theta^{\circ}\text{C}$

Liquidus

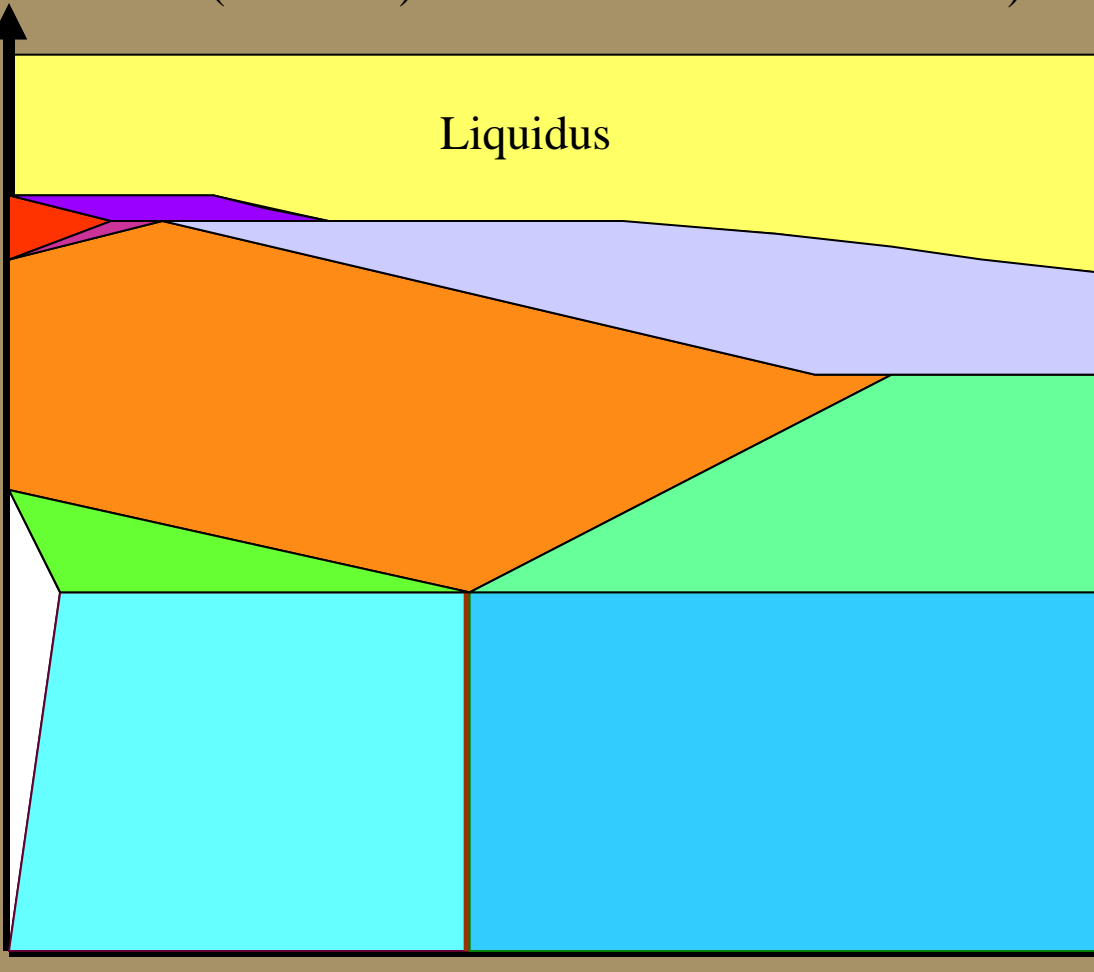
906

721

0

0

% C en masse

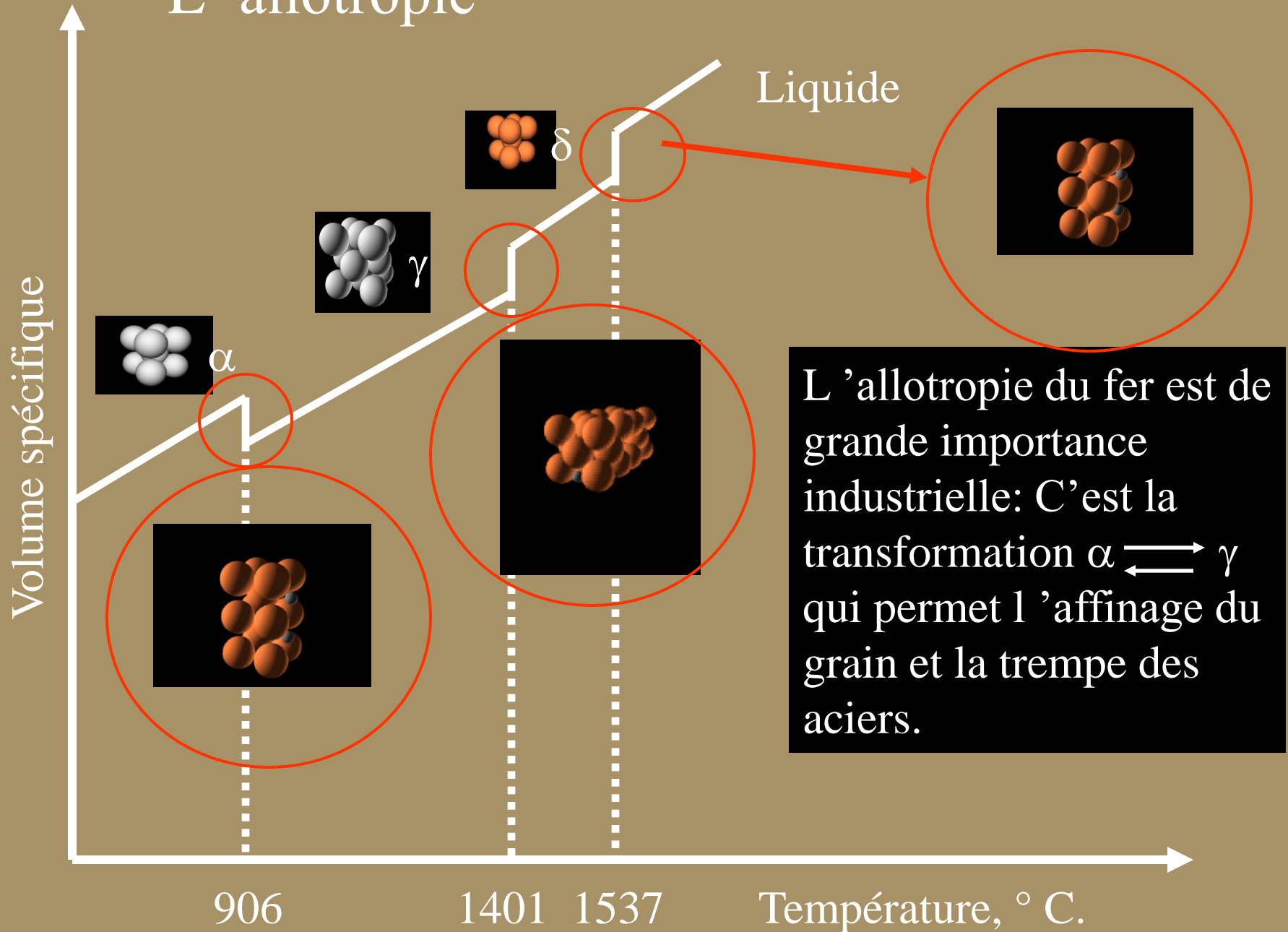


- Le fer α existe aux températures inférieures à 910°C et supérieures à 1392°C . Aux températures supérieures à 1392°C , le fer α est désigné par $\text{Fe}\delta$.
- Le fer α possède un réseau cubique centré, il est magnétique jusqu'à la température de 768°C . Cette température est appelée point de Curie, qui correspond à la transformation magnétique.
- Le Fer γ existe entre 910°C et 1392°C , il est paramagnétique et il a un réseau cristallin cubique à faces centrées.

Les points d'arrêts

- Si on étudie les courbes de refroidissement et de chauffage, on peut constater les transformations suivantes : le premier point d'arrêt apparaît à la température de 1539°C (température de fusion du fer).

L'allotropie



- Avec Abaissement de la température, la totalité du fer se solidifie et se cristallise à la température de 1392°C , à cette température, il y a apparition du deuxième point d'arrêt correspondant à la transformation : $\text{Fe}\delta \rightarrow \text{Fe}\gamma$ Ce point est désigné par AC4, ou AR4, respectivement pour le chauffage ou le refroidissement.

AC4 correspond à : $\text{Fe}\delta \rightarrow \text{Fe}\gamma$

AR4 correspond à : $\text{Fe}\gamma \rightarrow \text{Fe}\delta$

- Le troisième point critique (palier) se trouve à la température de 911°C , ce point est désigné par AC3, ou AR3.
- AR3 correspond à la transformation : $\text{Fe}\gamma \rightarrow \text{Fe}\alpha$ lors du refroidissement.
- AC3 correspond à la transformation : $\text{Fe}\alpha \rightarrow \text{Fe}\gamma$ lors du chauffage.

- **Le quatrième point est désigné par AR2 ou AC2, correspondant à la transformation magnétique dont la température est de 768°C, appelé aussi point de curie, au dessus de cette température le fer perd ses propriétés magnétiques et devient paramagnétique.**
- **Si on examine un morceau de fer à l'aide d'un aimant à la température de 750°C et 800°C, on constate qu'à 750°C, il est toujours attiré par l'aimant, tandis qu'à 800°C, il n'est plus attiré. Au dessous de AR2 ou AC2 on a la présence du Fe α .**

- **Remarque :**

Le Fer γ existe entre 910°C et 1392°C , il est **paramagnétique** et il a un réseau cristallin cubique à faces centrées.

Les points de transformations des aciers

- Ils jouent un rôle prédominant dans la détermination des températures des traitements thermiques (trempe, revenu, recuit et cémentation).

Les points de transformation dans les aciers

- Ces points sont notés par A_0 , A_1 , A_2 , A_3 et A_{cm} , lors du chauffage ou du refroidissement.
- Ils sont notés respectivement par :
 - AC_0 , AC_1 , AC_2 , AC_3 et ACC_m
(chauffage)
 - Ar_0 , Ar_1 , Ar_2 , Ar_3 et ArC_m
(refroidissement)

- - A0 : ($T = 210^{\circ}\text{C}$) correspond à la transformation lors du chauffage de la cémentite ferro-magnétique en cémentite non magnétique.
- - A1 : ($T = 727^{\circ}\text{C}$) correspond à la transformation réversible perlite –austénite.
- - A2 : point de curie ($T = 769^{\circ}\text{C}$), au dessus de cette température le fer perd ses propriétés magnétiques
- - A3, correspond aux températures associées à la transformation **phase $\gamma \rightarrow$ + phase α + phase γ** ,
 - Acm, associée à la transformation **phase $\gamma \rightarrow$ phase γ + cémentite (Fe_3C)** (Cm est le symbole abrégé de la cémentite).

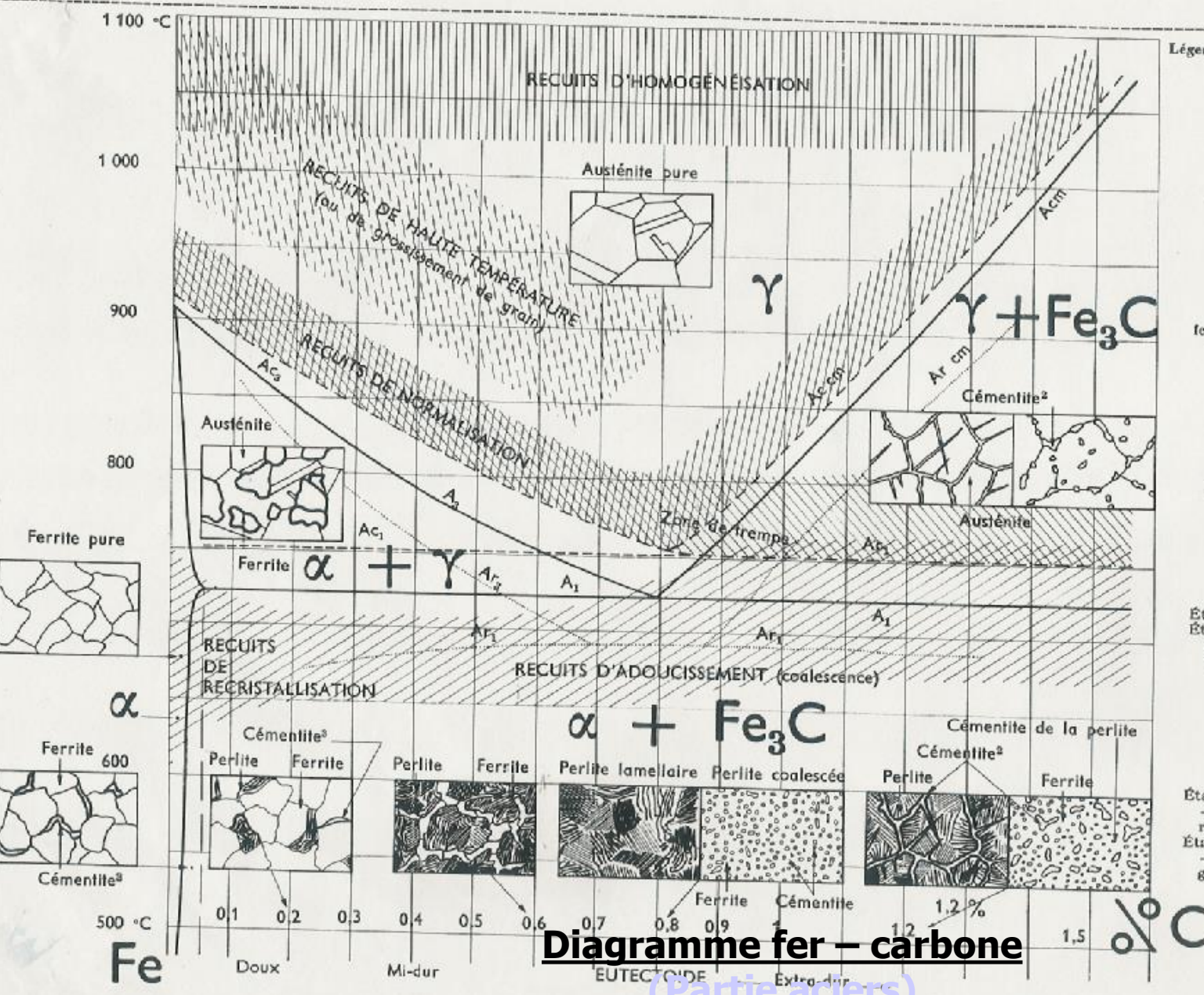


Diagramme fer - carbone
(Partie aciers)

Légende des schémas de structure

- Acier à 0,04 % C :
ferrite + cémentite tertiaire.
- Acier à 0,2 % C :
ferrite + perlite lamellaire + cémentite tertiaire.
- Acier à 0,6 % C :
perlite lamellaire + ferrite.
- Acier à 0,8 % C :
État recuit : perlite lamellaire.
État coalescé : perlite globulaire (globules fins de cémentite sur fond ferritique).
- Acier à 1,2 % C :
État recuit : perlite lamellaire + cémentite secondaire en réseau.
État coalescé : perlite globulaire + cémentite secondaire en gros globules.

La position des lignes A_1, A_2, A_3, A_{cm} varie avec la teneur en Mn, Si, P, Ni, Ca, ... et avec la «propreté» de l'acier.

Les constituants des aciers présentés sur le diagramme Fe-C

- **Le fer** : élément de base de l'alliage de fer
- **Le carbone** : soluble dans le fer à l'état liquide et solide, et peut aussi former une combinaison chimique : la cémentite ou carbure de fer Fe_3C .
- **La ferrite α**
- **La ferrite δ**
- **L'austénite γ**
- **La cémentite Fe_3C**
- **La perlite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)**

Ferrite

C'est une solution solide de carbone dans le fer α , c'est à dire la ferrite est constituée par du fer α renfermant des traces de carbone (faible teneur en carbone, inférieure à 0,02 %), ainsi que d'autres inclusions.

On distingue la ferrite α à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à 0,02 % et la ferrite δ à haute température et à solubilité limite en carbone allant jusqu'à 0,1 %. La ferrite est peu tendre et très ductile ($HV = 90$, $R_m = 300 \text{ N/mm}^2$, $K = 300 \text{ J/cm}^2$), Elle est magnétique à ta température ordinaire, au microscope ta ferrite a l'aspect de grains homogènes polyédriques. Elle possède un réseau cubique centré et elle est ferromagnétique jusqu'à 760°C .

Austénite

C'est une solution solide de carbone et d'autres inclusions dans le fer γ . La solubilité limite du carbone dans le fer γ est de 2,14 %. L'austénite est stable à haute température, elle est peu dure et relativement malléable (HB = 300). La microstructure de l'austénite est composée de grains polyédriques. Elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable. Elle est anti-ferromagnétique.

Cémentite (Carbure de fer)

La cémentite ou carbure de fer (Fe_3C) est une combinaison chimique de fer et de carbone dont la teneur en carbone peut atteindre 6,67 %. Elle est magnétique jusqu'à 210°C et très dure ($\text{HB} = 700$) mais fragile. La microstructure de la cémentite peut se présenter dans les aciers sous les formes suivantes :

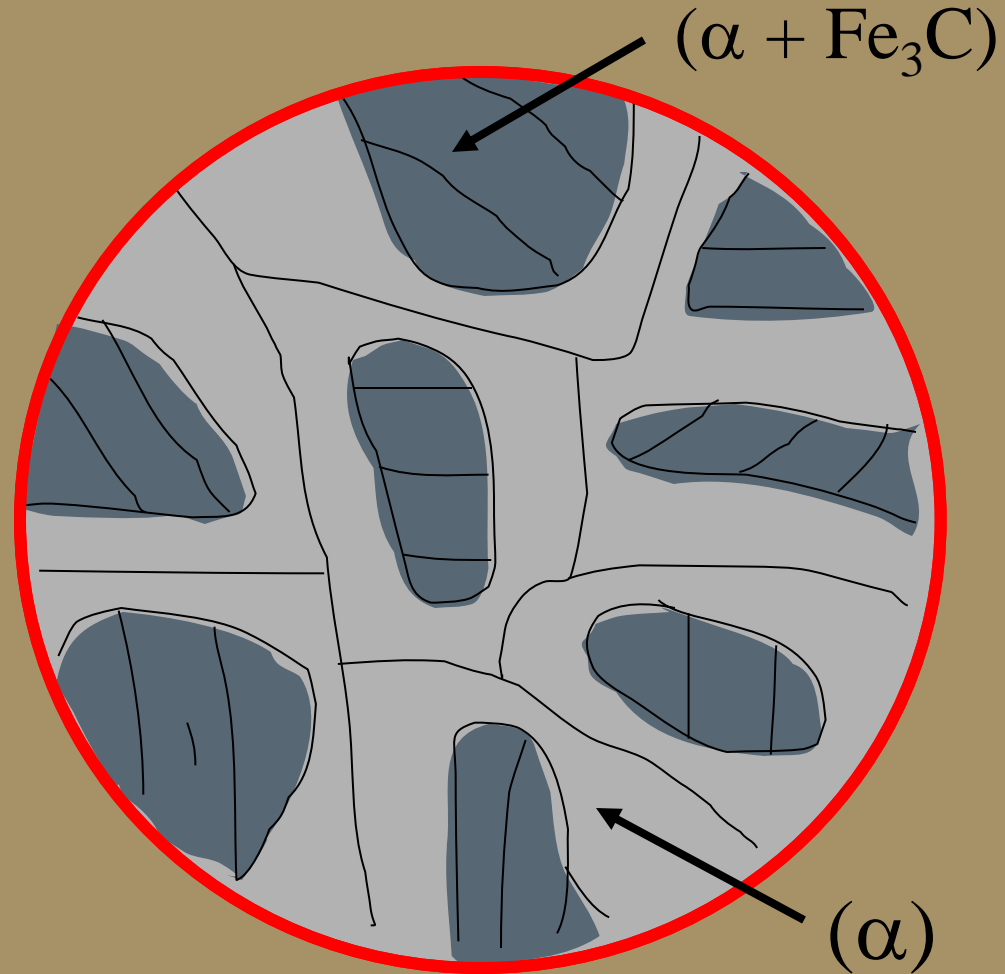
Perlite

C'est un eutectoïde formé d'un mélange de grains de cémentite, sphéroïdaux noyés dans la ferrite globulaire en couches alternées (88 % de ferrite et 12 % de cémentite). Elle est obtenue lors du refroidissement et par décomposition de l'austénite à 0,8 % de carbone.

Elle présente dans l'acier ordinaire toujours une teneur en carbone de 0,85 %. La perlite est dure ($HV = 200$) et assez ductile $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$.

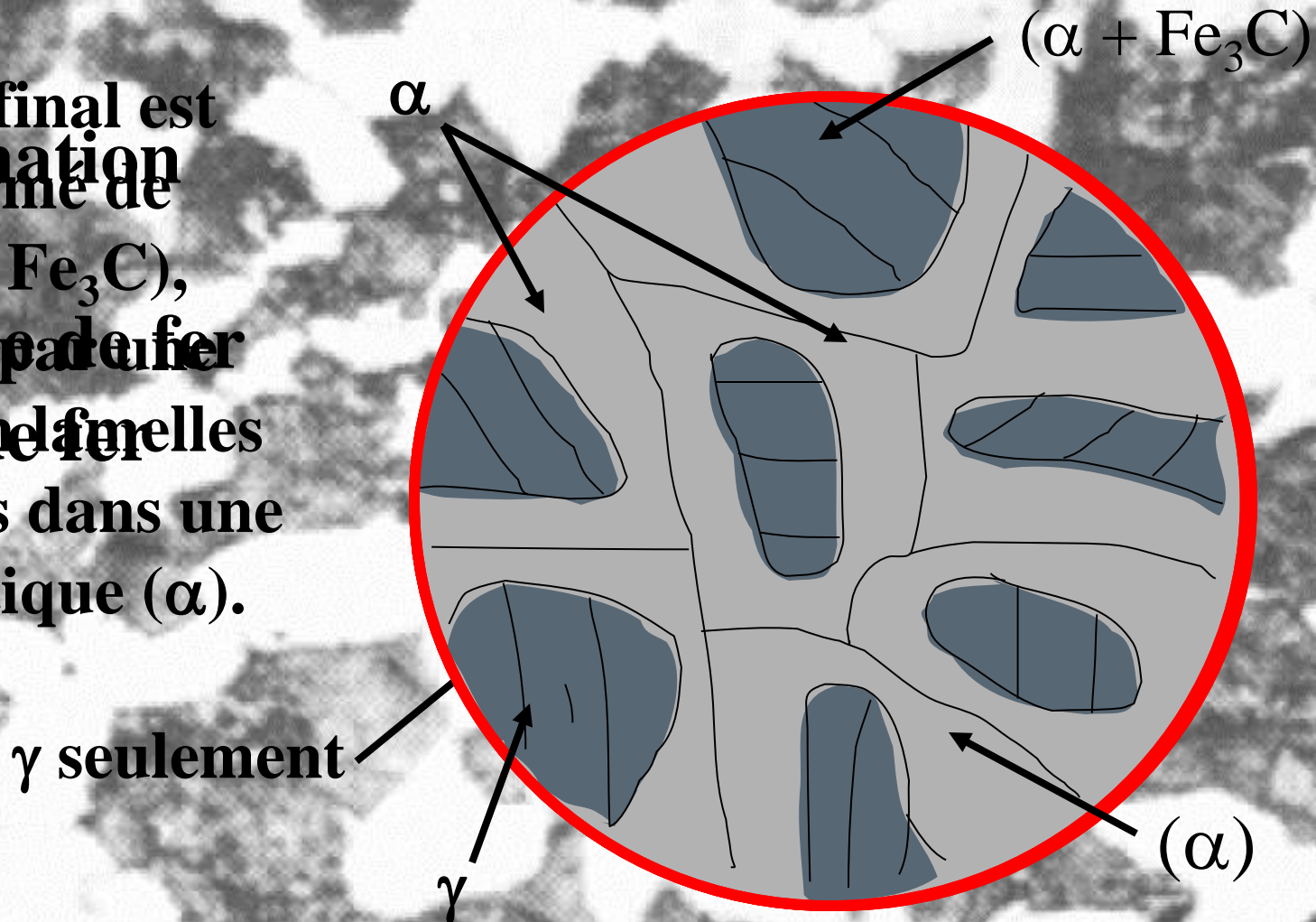
Aciers hypoeutectoïdes

Le produit final est un acier formé de perlite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), caractérisé par une structure en lamelles enveloppées dans une phase ferritique (α).



Aciers hypoeutectoides

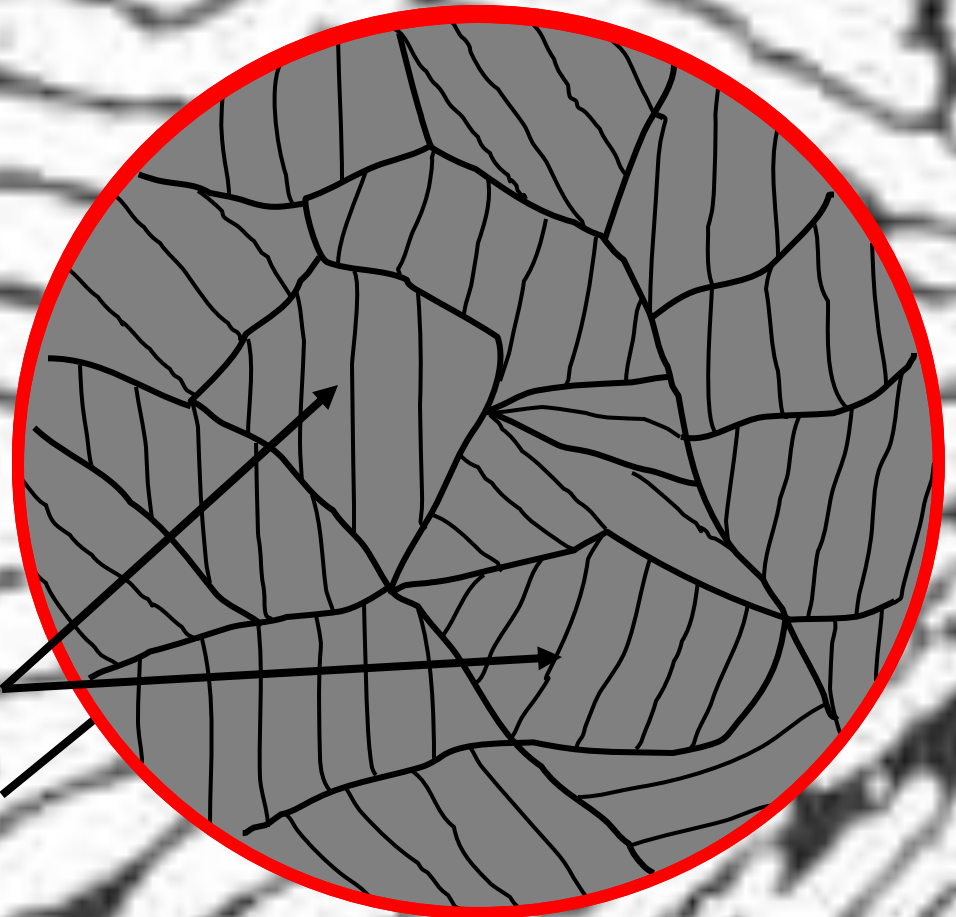
Le **stade final** est un acier formé de **présence** $(\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$, **simultanément** de **fer** **structure de lamelles** **enveloppées** dans une **phase ferritique** (α) .



Aciers eutectoïdes

Austénite.
Le produit final est un acier formé de perlite seulement ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), caractérisé par une structure en lamelles.

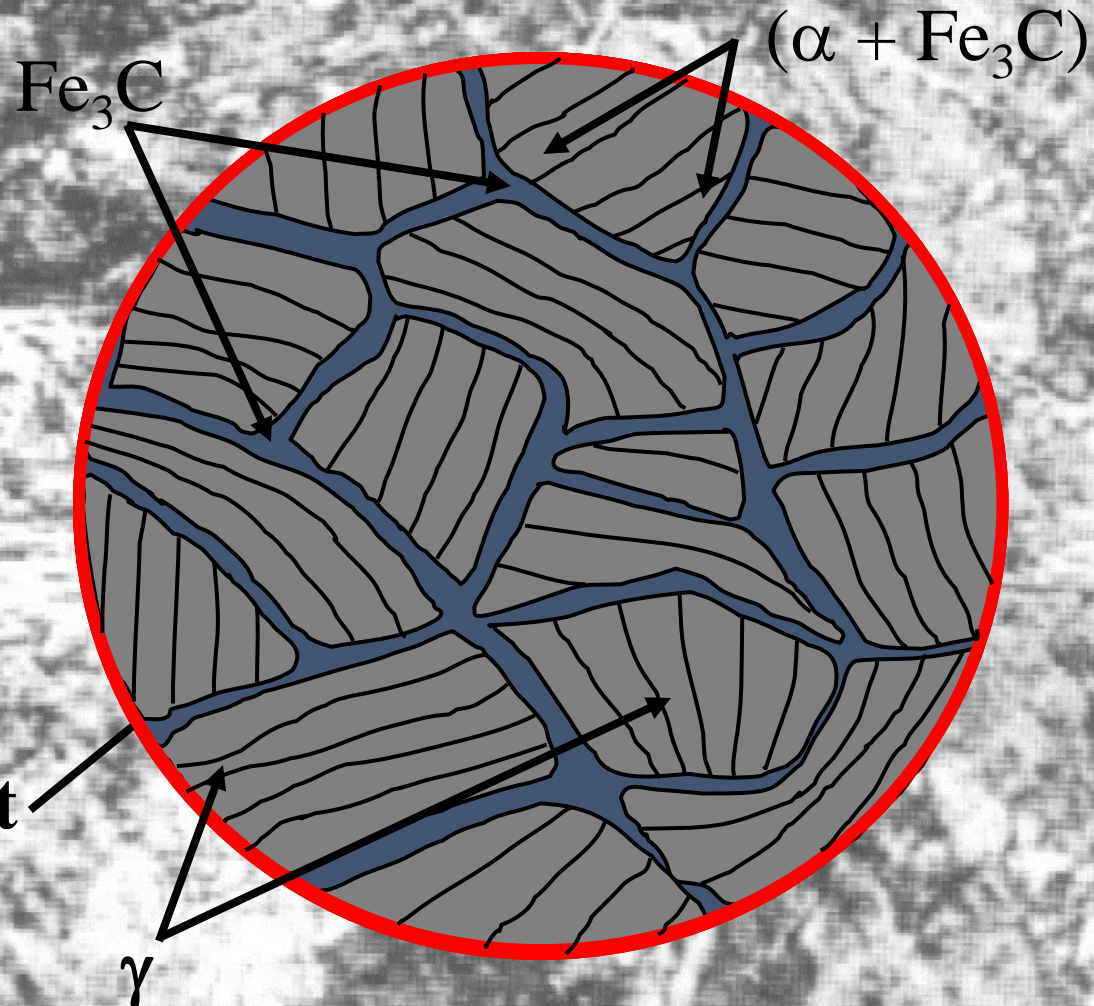
$(\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$
 γ seulement



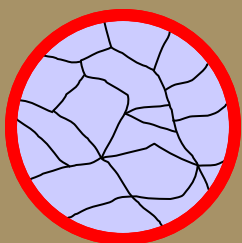
Aciers hypereutectoides

Le produit final est
Austénite
un acier formé de
transformation
perlite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) et
présence
de cémentite (Fe_3C)
simultanée de fer
caractérisé par une
gamma et de
structure en lamelles
cémentite
enveloppées dans de
la cémentite

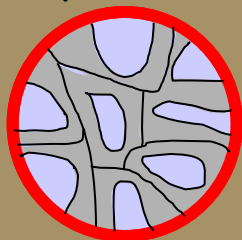
γ seulement



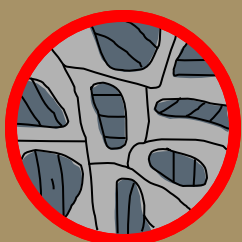
A) γ seulement



B) $\gamma + \alpha$

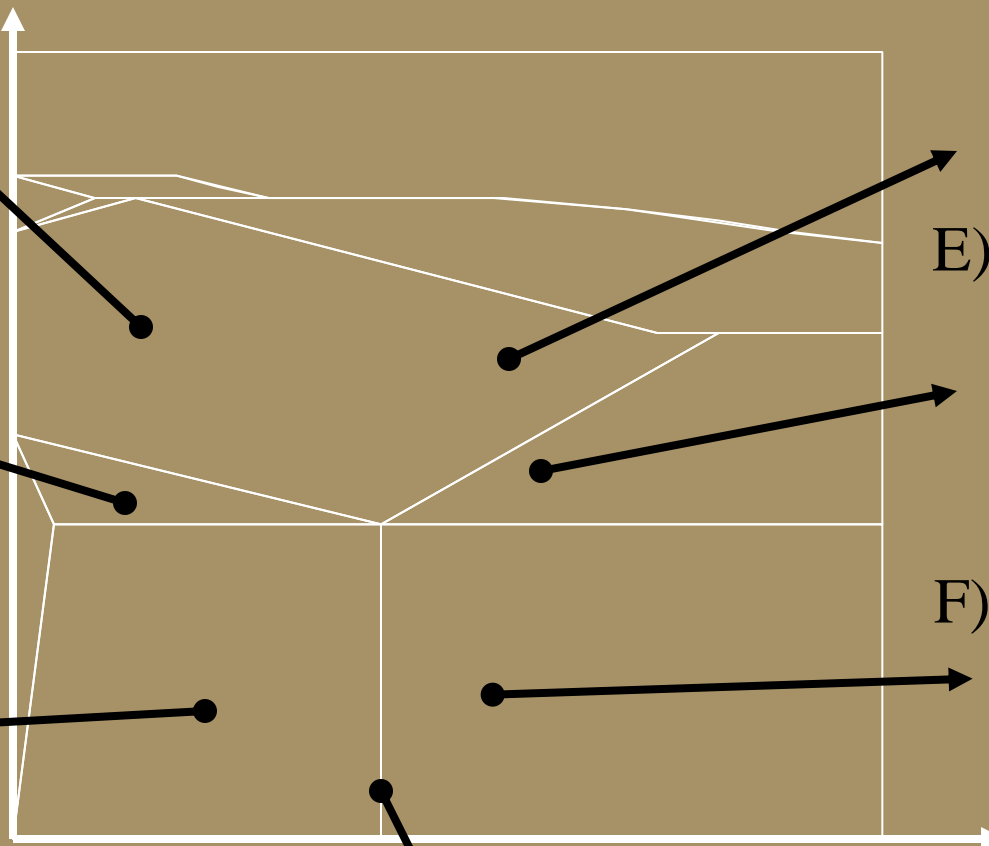


C) α

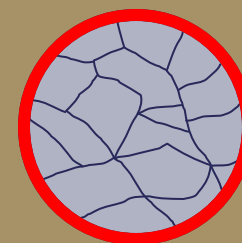


$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$
(perlite)

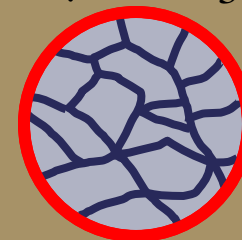
Composition
eutectoïde
0,8% de carbone



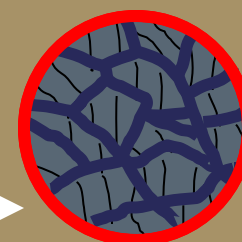
D) γ seulement



E) $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$



F) Fe_3C



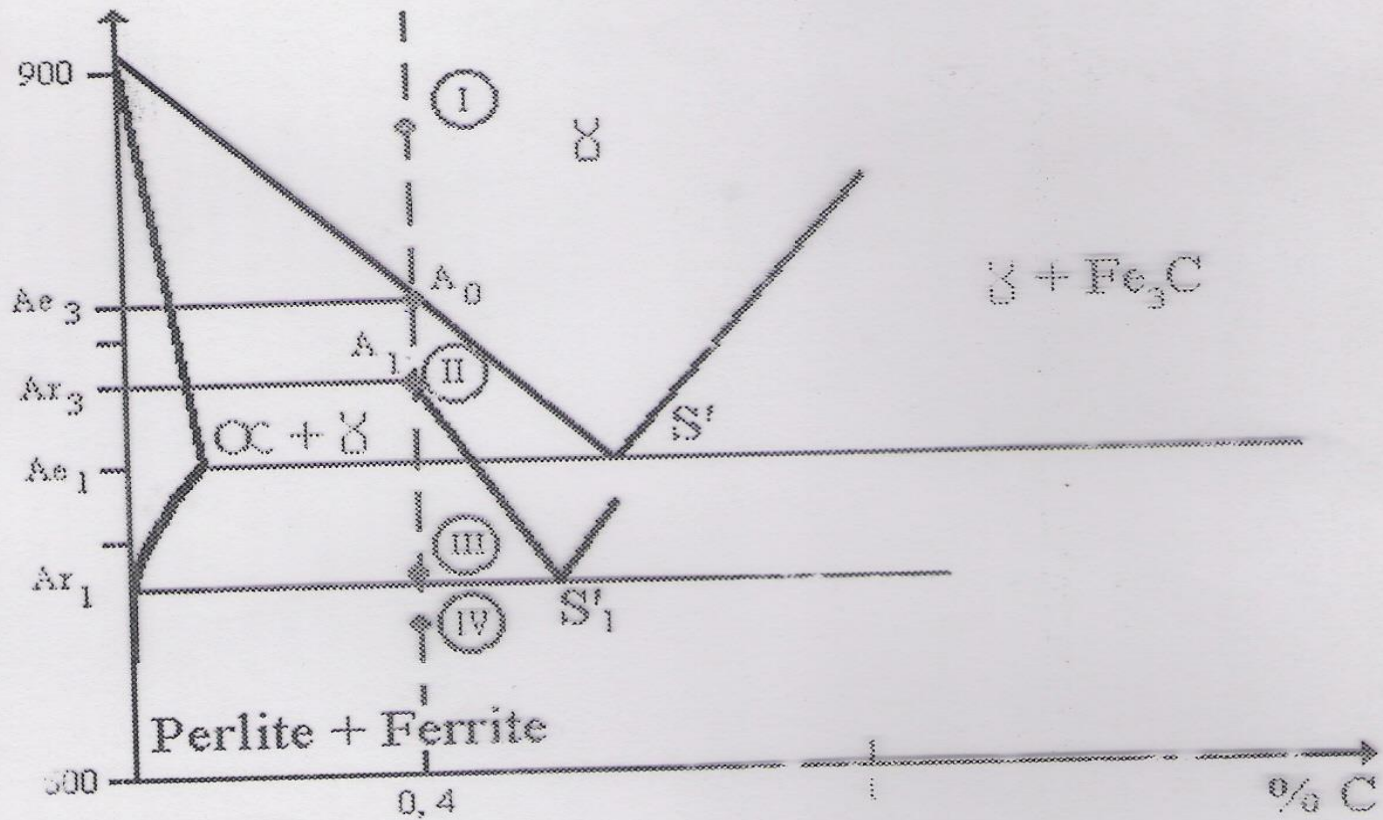
G) $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$
(perlite) seulement

$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$
(perlite)

Suivi de la formation d'un acier

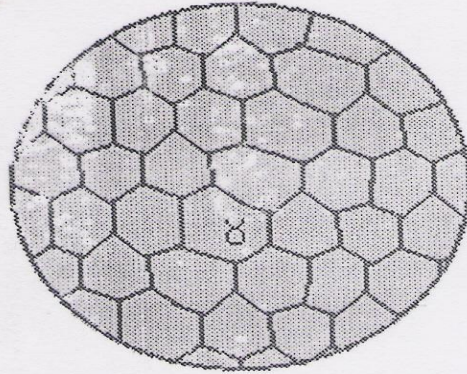
(en fonction de la vitesse de refroidissement)

Exemple : acier à 0,4%C : acier hypoeutectoïde (ferrito-perlitique).

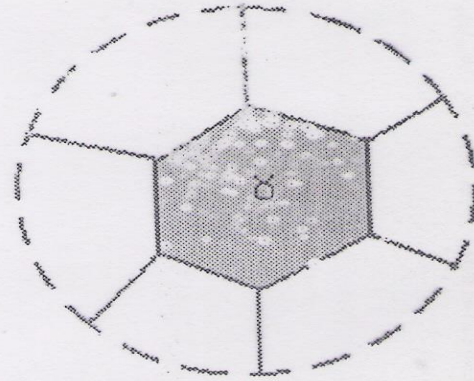


❖ **Position I :** (Domaine austénitique).

- Nous avons une structure polycristalline monophasée (phase γ).
- La phase γ est caractérisée par une grosseur de grains déterminée par les conditions d'austénitisation (θ_a : température d'austénitisation, t_a : durée d'austénitisation).



Etat ①
 γ homogène



❖ **Position II :**

- La température atteint A_{r3} ($< A_{e3}$) caractéristique de la vitesse de refroidissement utilisée.
- La germination de la phase ferritique α commence.
- La germination a lieu en général aux joints de grains austénitiques.

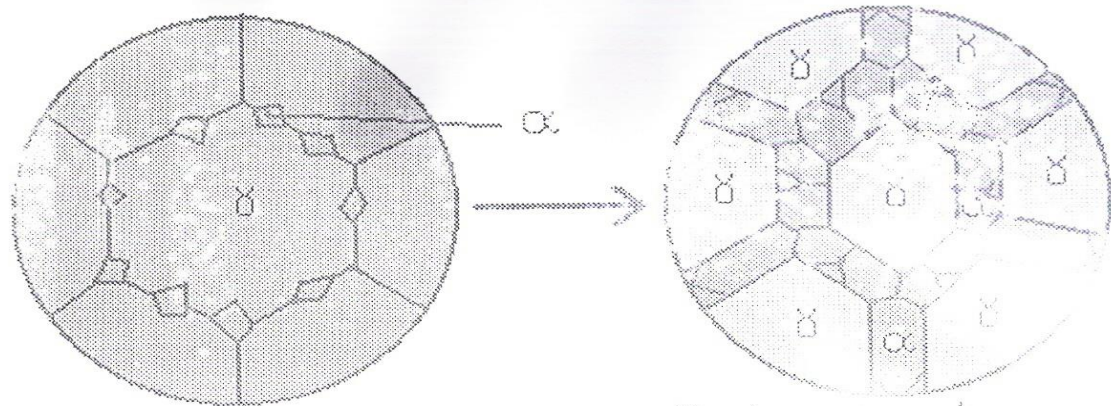
Etat II
Germination de
la ferrite
proeutectoïde



❖ Position III :

La croissance des cristaux de ferrite proeutectoïde dépend de la vitesse de transfert de l'énergie thermique produite par la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ et de la vitesse de diffusion de carbone.

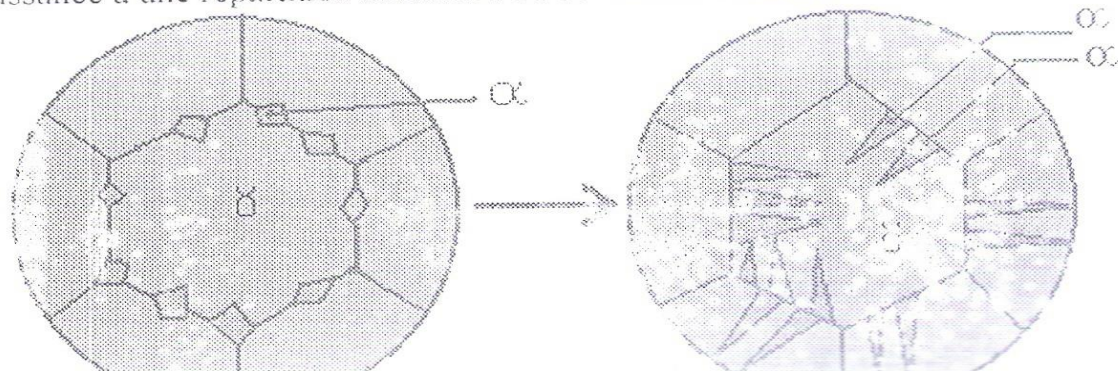
- Pour des vitesses de refroidissement faibles ou des grains austénitiques petits, les cristaux ferritiques prennent la forme polygonale et conduisent à une répartition cellulaire de la ferrite.



Structure polygonale cellulaire du α proeutectoïde

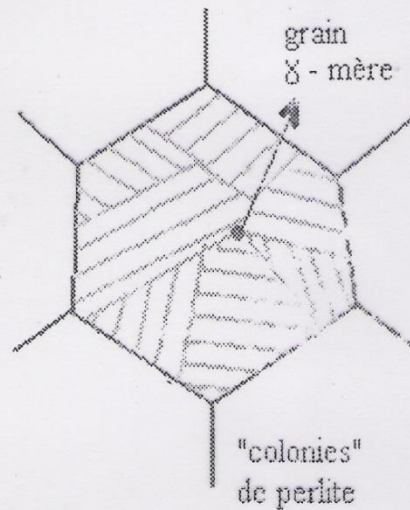
- Pour des vitesses de refroidissement élevées ou des grains austénitiques grands, les cristaux ferritiques se développent sous forme de plaquettes.

Les plaquettes apparaissent parallèles à des directions déterminées donnant naissance à une répartition aciculaire ou de widmanstätten.



❖ Position IV :

- A la traversée de la ligne eutectoïde A_{r1} , l'austénite restante en III subit la transformation perlitique et est remplacée entièrement par des colonies de perlite.



Remarque :

- L'aspect micrographique des aciers hypereutectoïdes est analogue à celui des aciers hypoeutectoïdes, la cémentite y remplaçant la ferrite.

- Généralement ces aciers, sont constitués de plages de perlite entourées d'un liseré de cémentite.

On y rencontre aussi la structure de widmanstätten.

FIN DE L'EXPOSE
MERCI DE VOTRE ATTENTION