



Chapitre 4 – Les alliages

- Solutions

- Thermodynamique des solutions
- Propriétés des solutions

- Composés intermétalliques

- Thermodynamique
- Propriétés

- Quelques exemples type



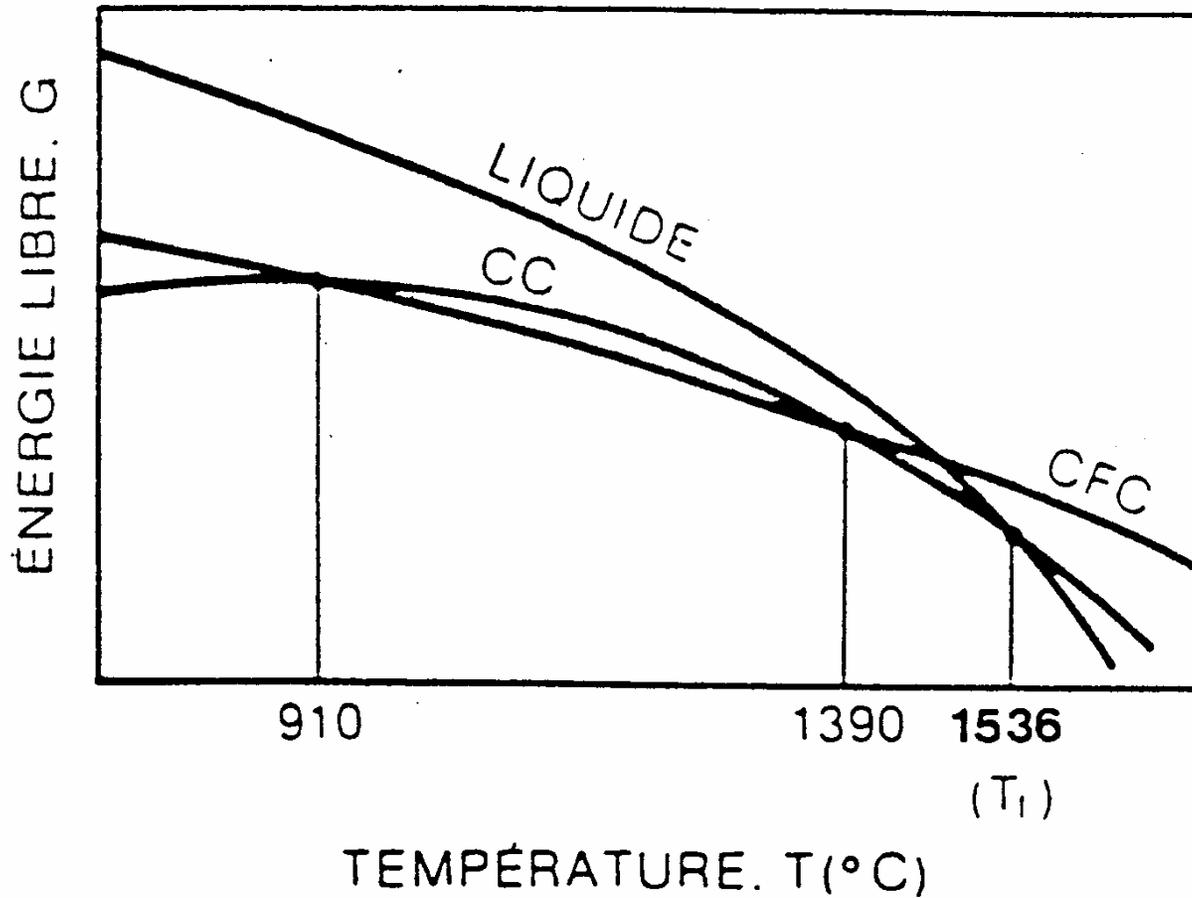


Application

1. Les alliages fer-carbone
2. Les alliages d'aluminium

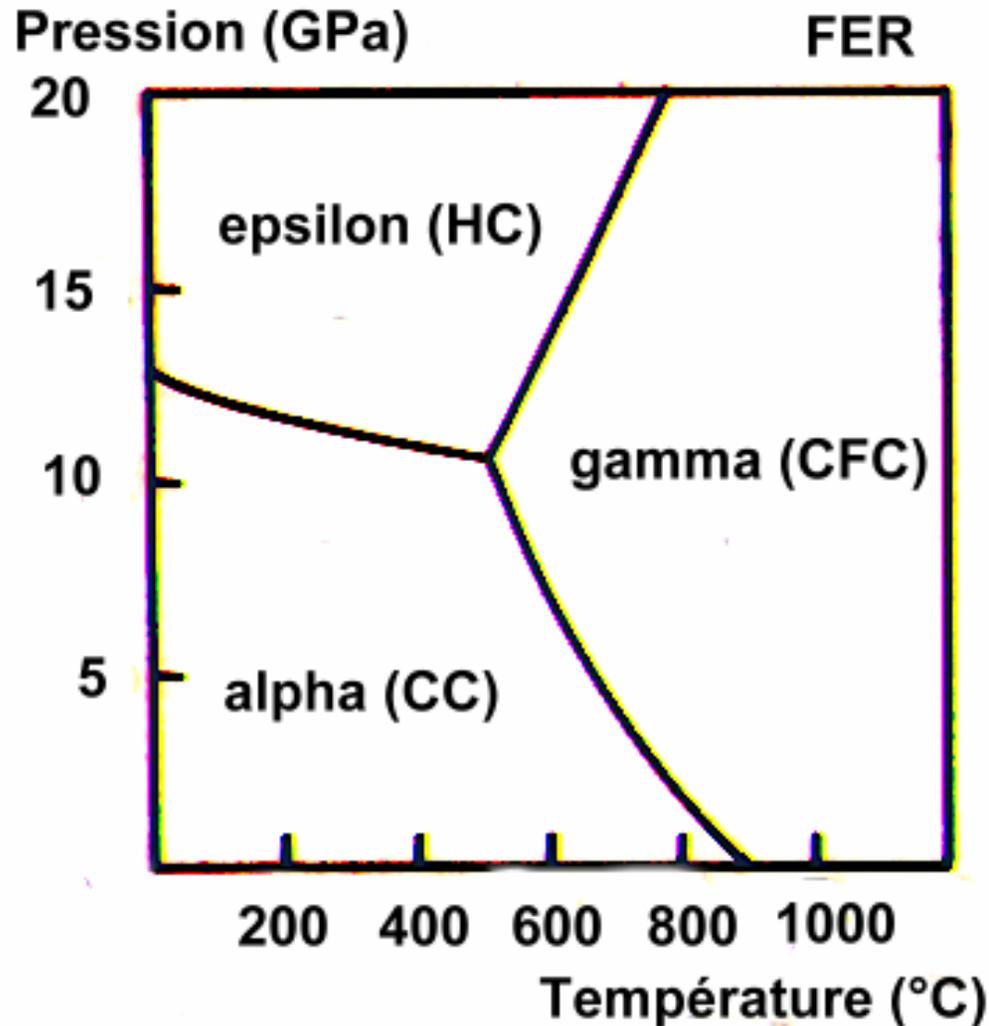


Le fer pur



Le
réseau
dépend
de T

Le fer pur

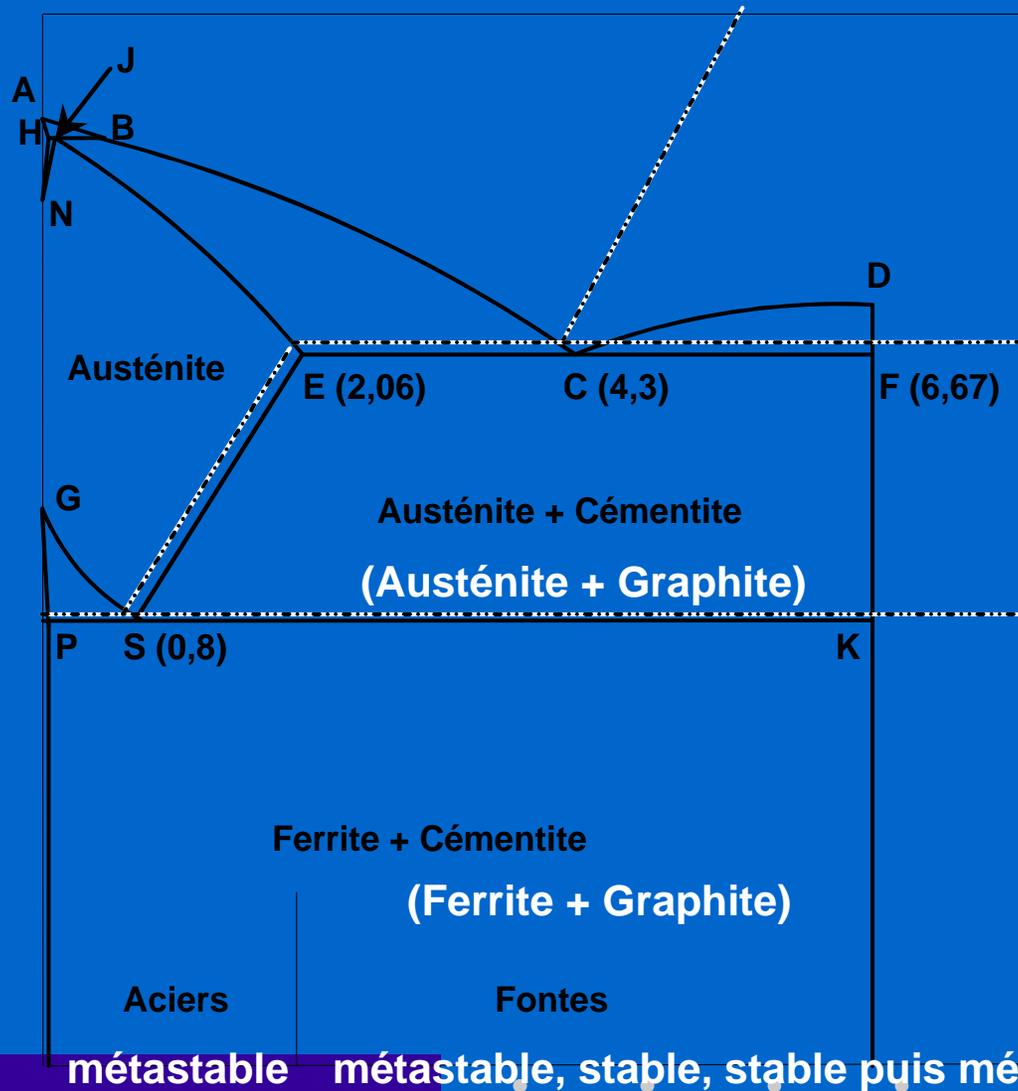


- Le réseau dépend enfin de P
- A haute pression on évolue vers des réseaux plus compact.

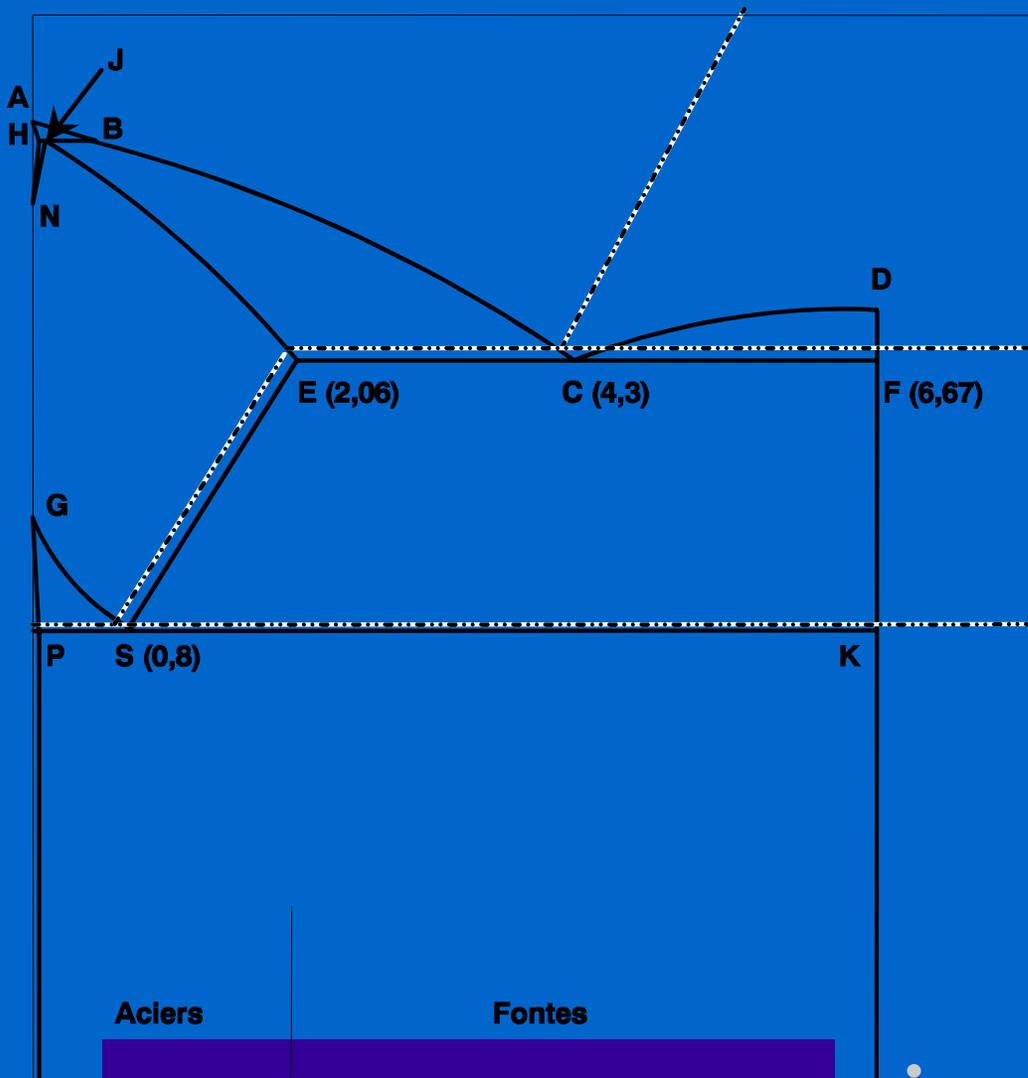
Le fer pur

- États allotropiques :
 - α (cc)
 - γ (cfc)
 - δ (cc)
 - ε (hc)
- Solubilité limitée du carbone, avec rejet :
 - de graphite
 - de cémentite

Les diagrammes fer - carbone



Les 3 types de fontes

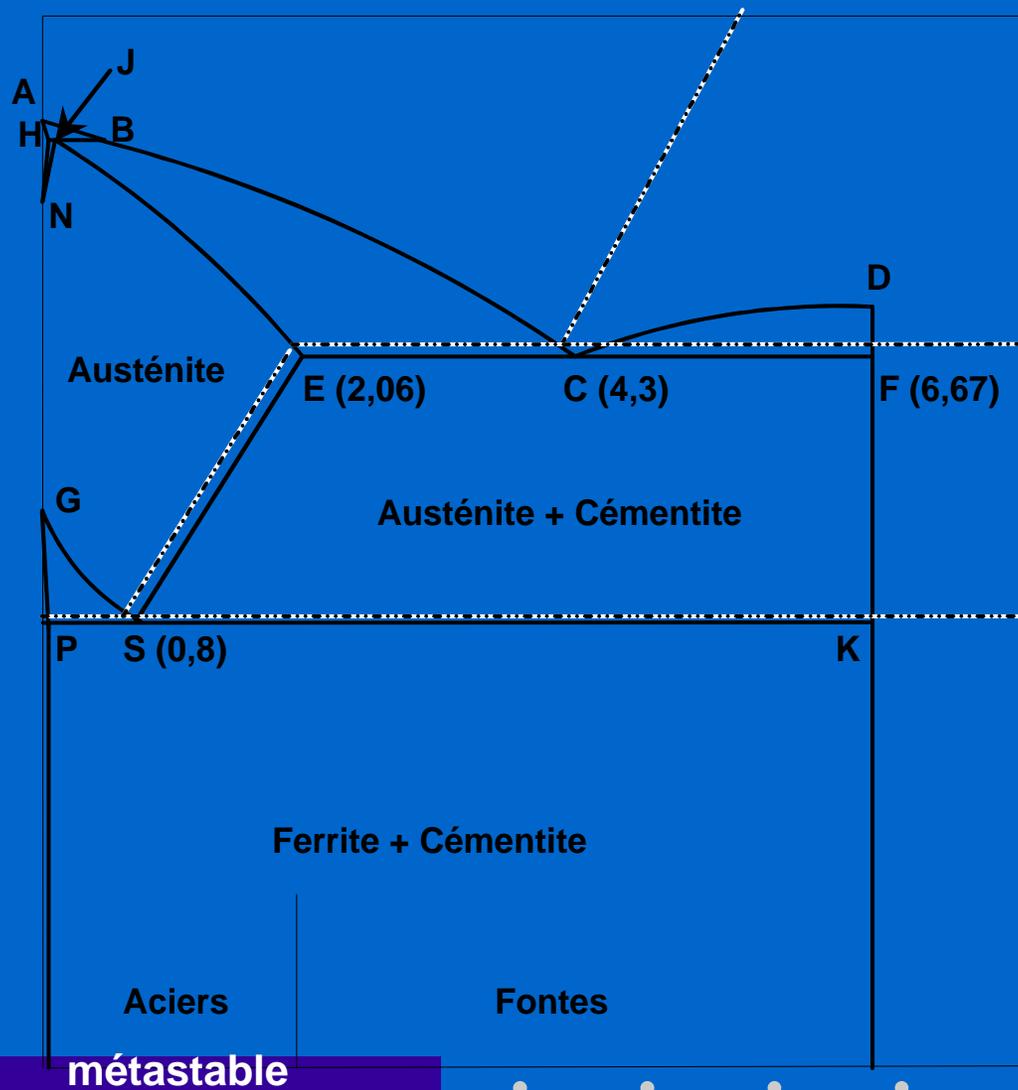


1. Fontes blanches
fer-cémentite

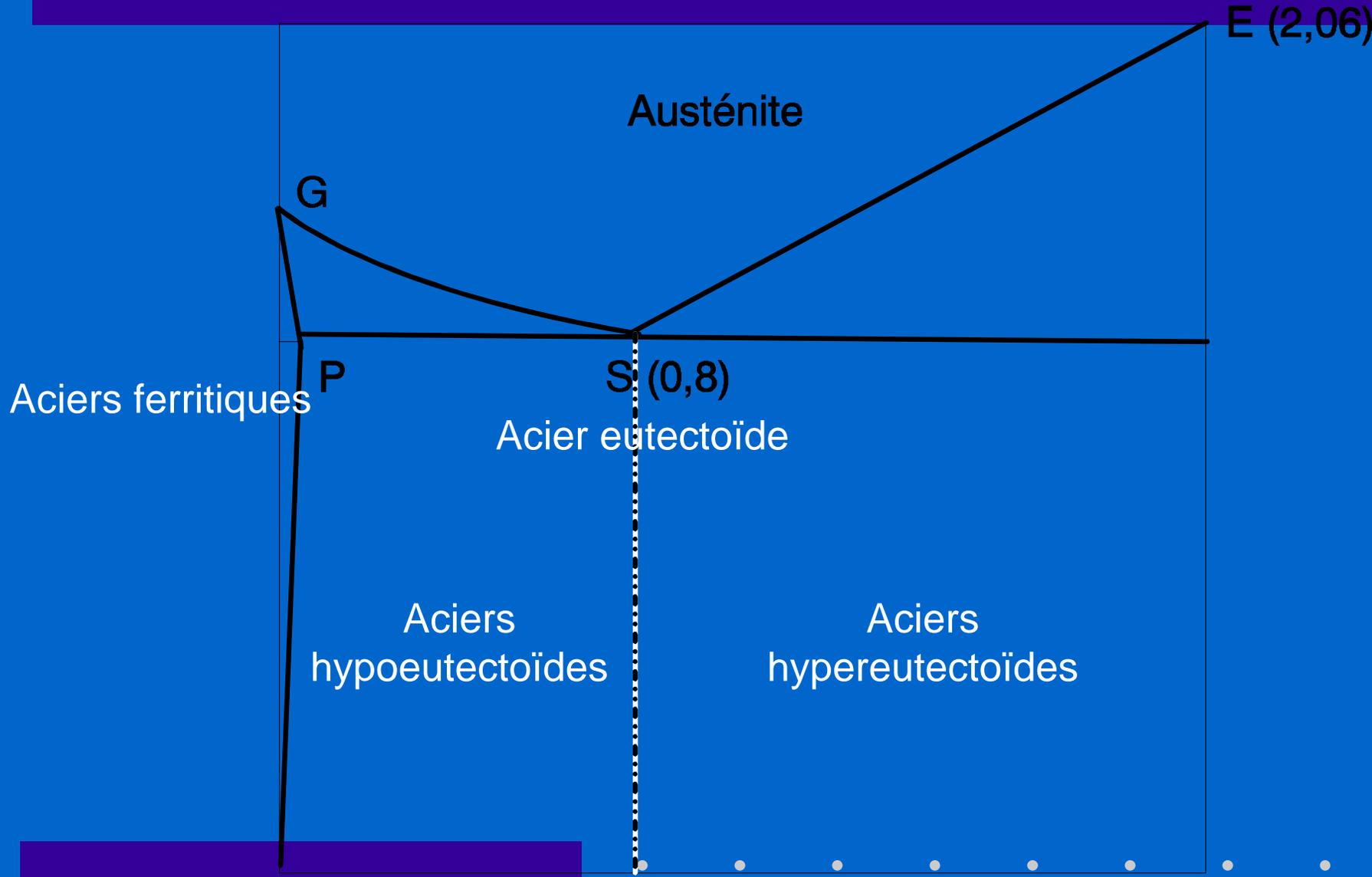
2. Fontes malléables
fer-graphite

3. Fontes grises
solidification fer-graphite
transformations allotropiques
fer-cémentite

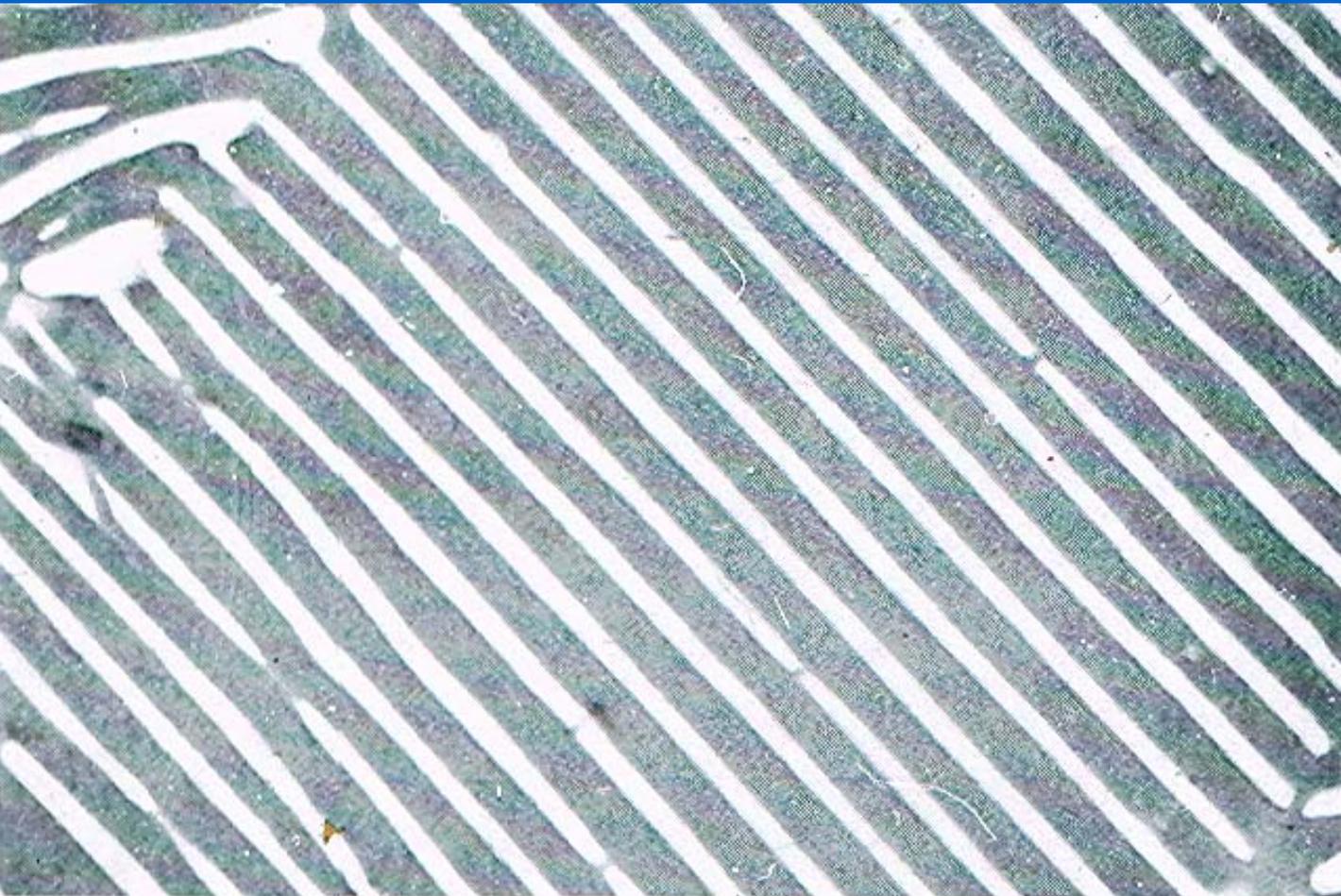
Les diagrammes fer - carbone



Les aciers



L'acier eutectoïde



20000 ; 1

L'eutectoïde
constitué de
lamelles
alternées de
ferrite et de
cémentite
porte le nom
de perlite

L'acier eutectoïde

Suivant la vitesse de refroidissement les lamelles peuvent être plus ou moins fines

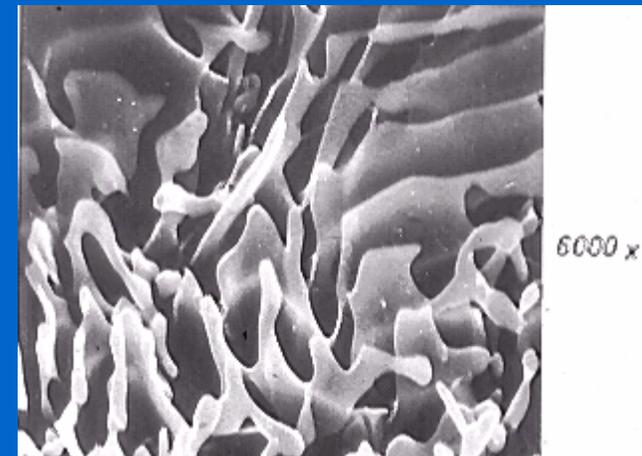
En cas de refroidissement rapide, seule la microscopie électronique permet d'identifier les 2 phases.



200 X

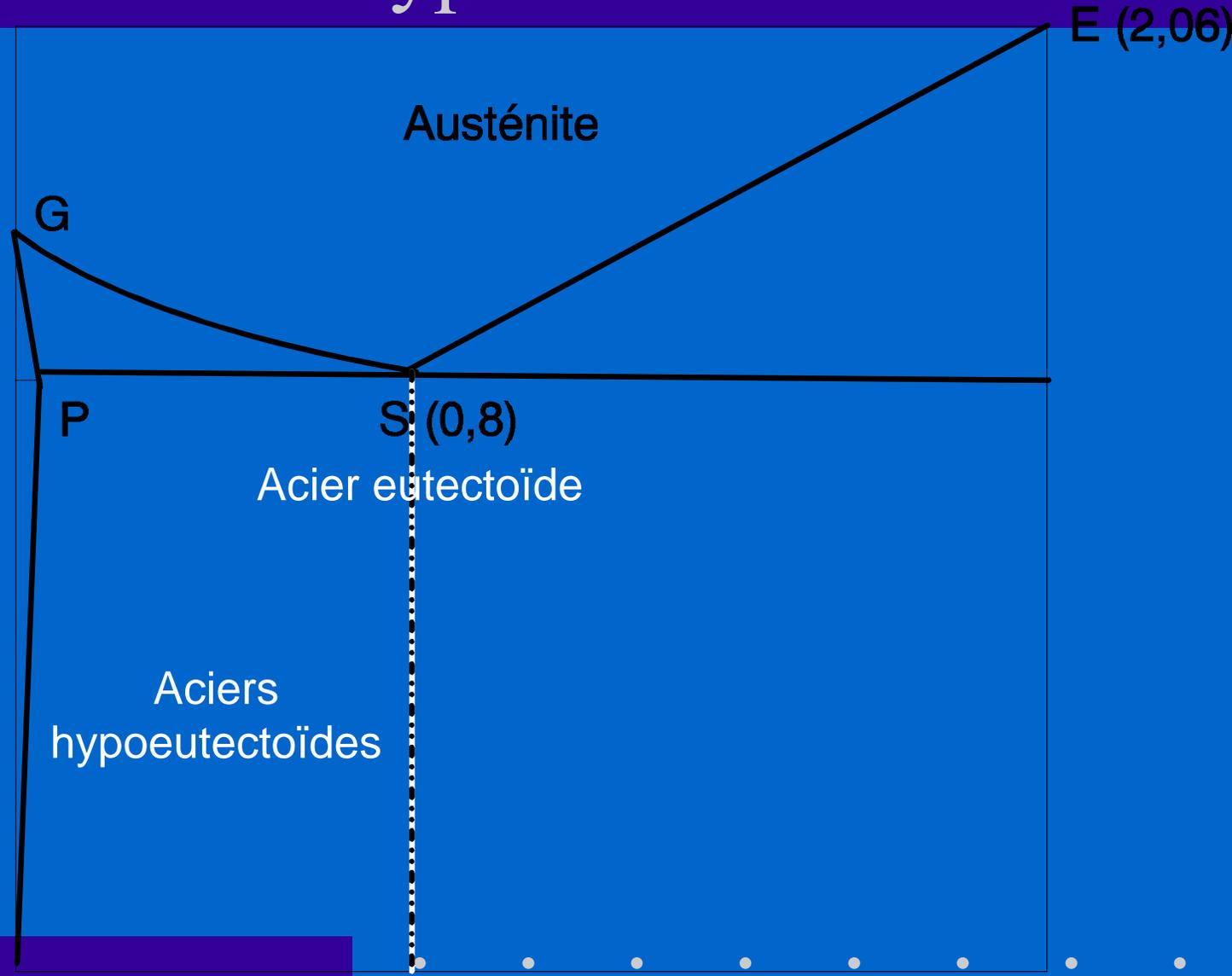


3000 X



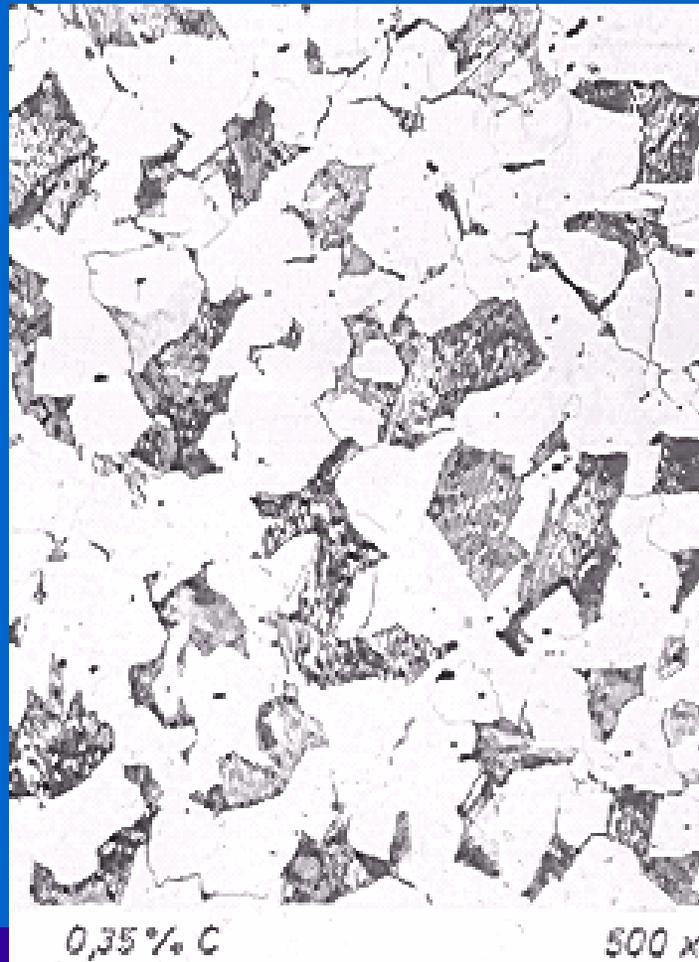
6000 x

Les aciers hypoeutectoïdes



Les aciers hypoeutectoides

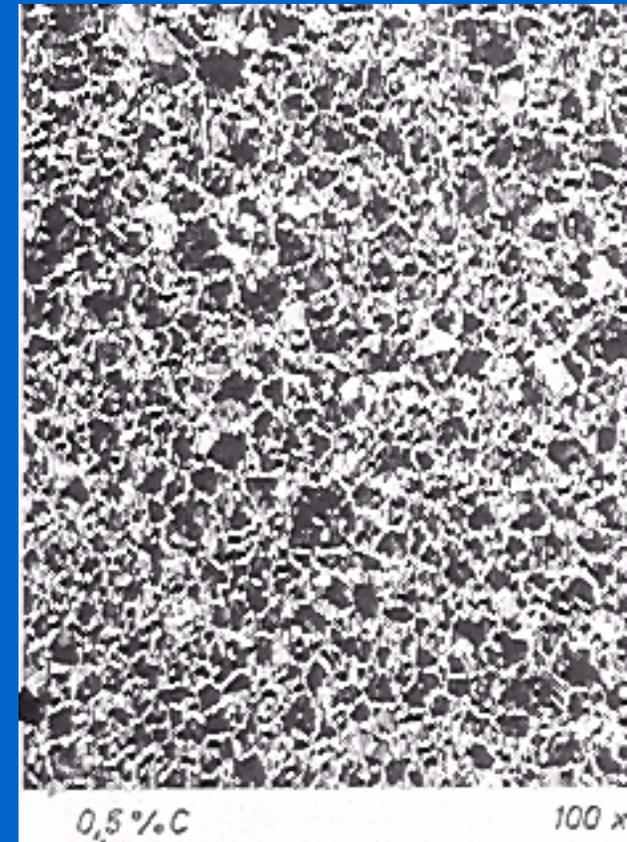
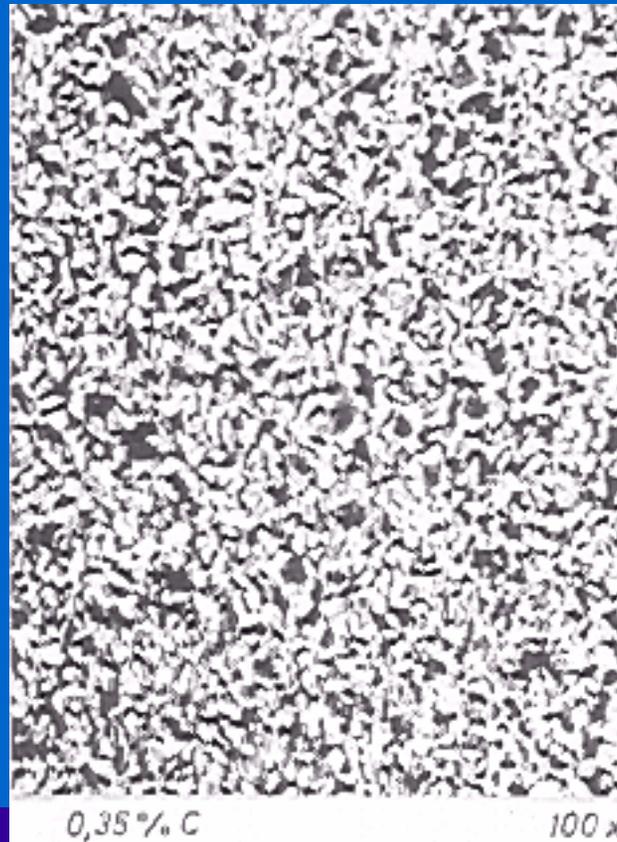
Ils sont constitués de ferrite proeutectoïde et de perlite.



Les aciers hypoeutectoides

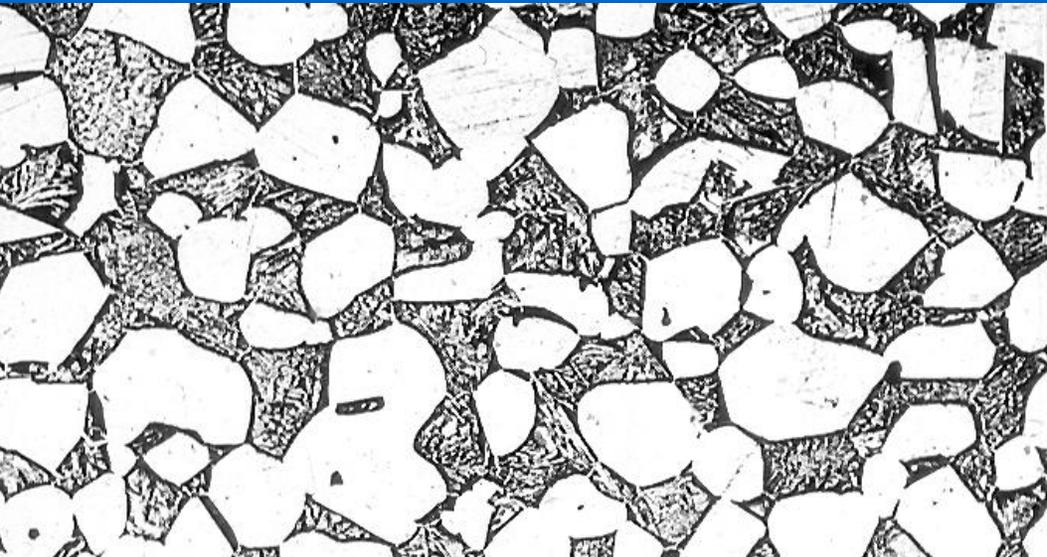
En augmentant le teneur en carbone

- La teneur en ferrite décroît
- La teneur en perlite croît

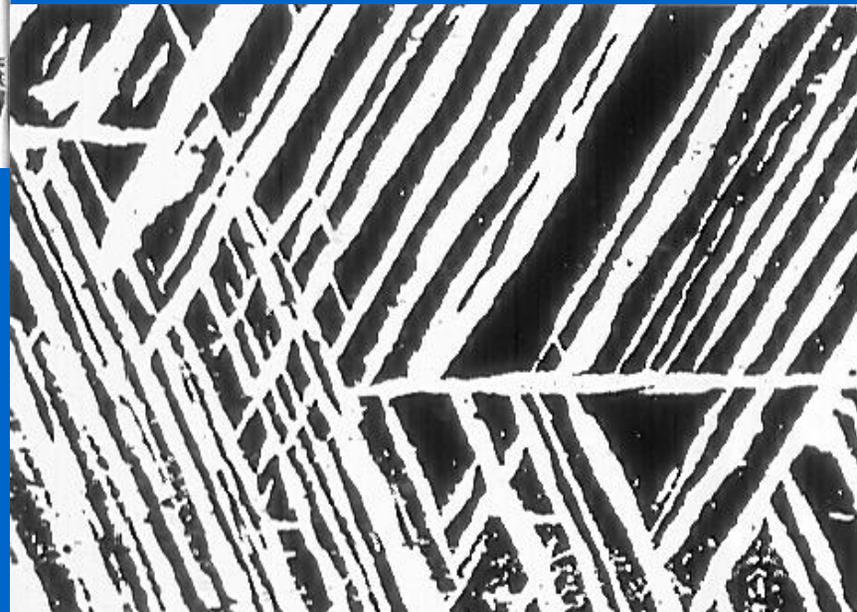


Les aciers hypoeutectoides

Ferrite cellulaire

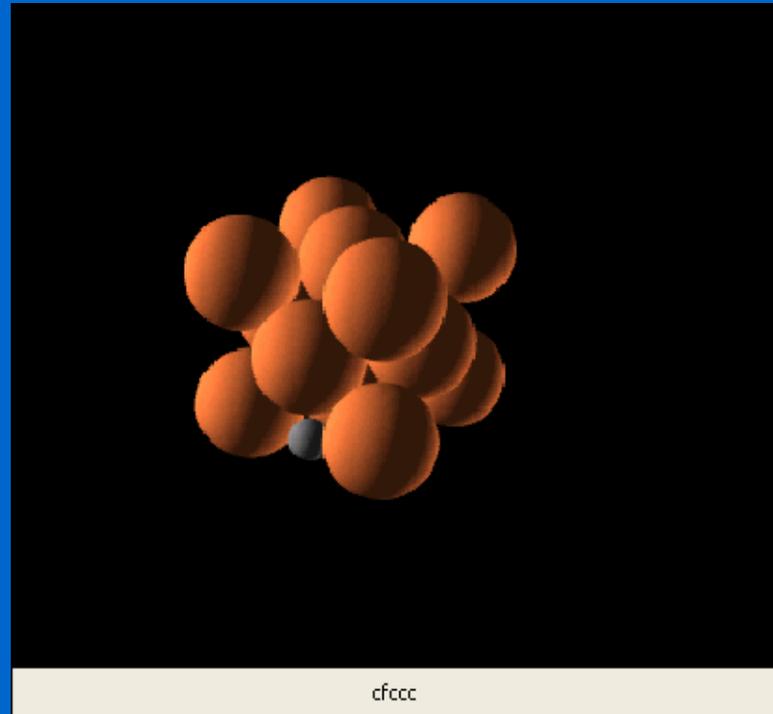


Ferrite aciculaire
Structure de Widmanstätten

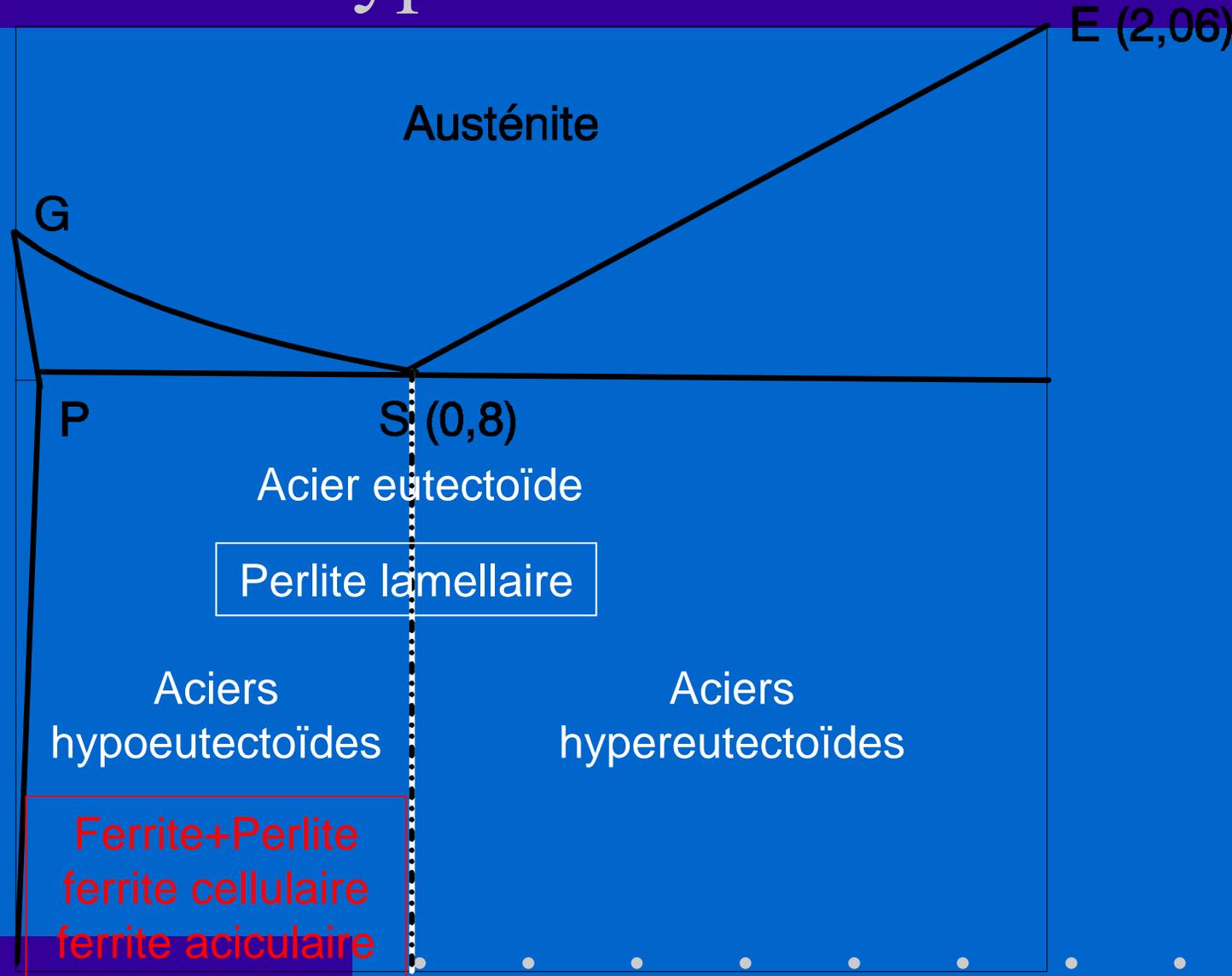


-
-
-

La transformation CFC \rightarrow CC

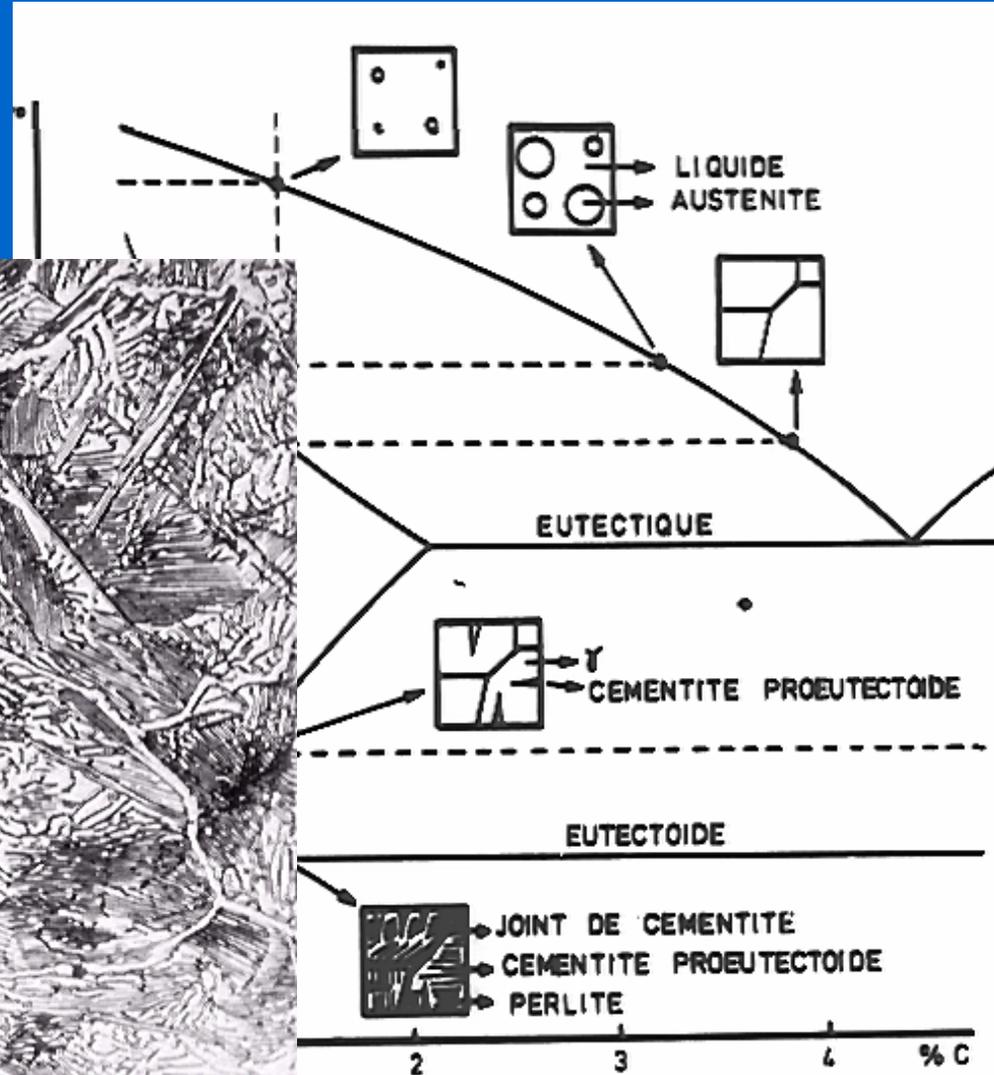


Les aciers hypereutectoïdes

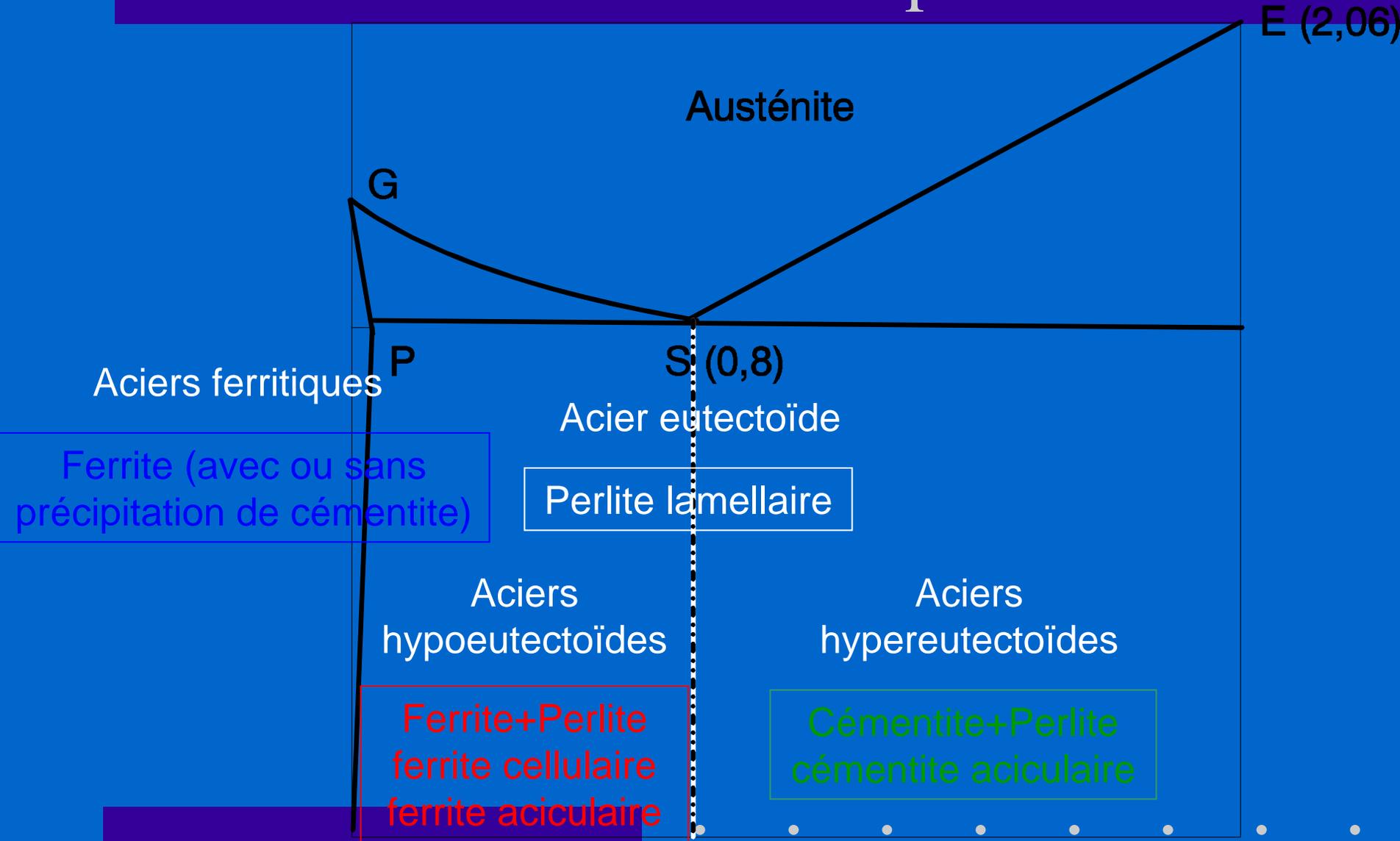


Les aciers hypereutectoides

Ils sont constitués de cémentite proeutectoïde et de perlite.

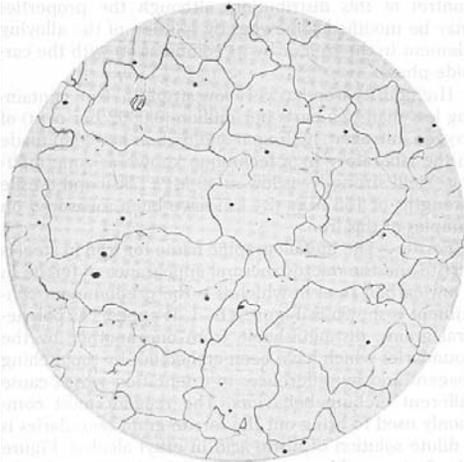


Les aciers ferritiques

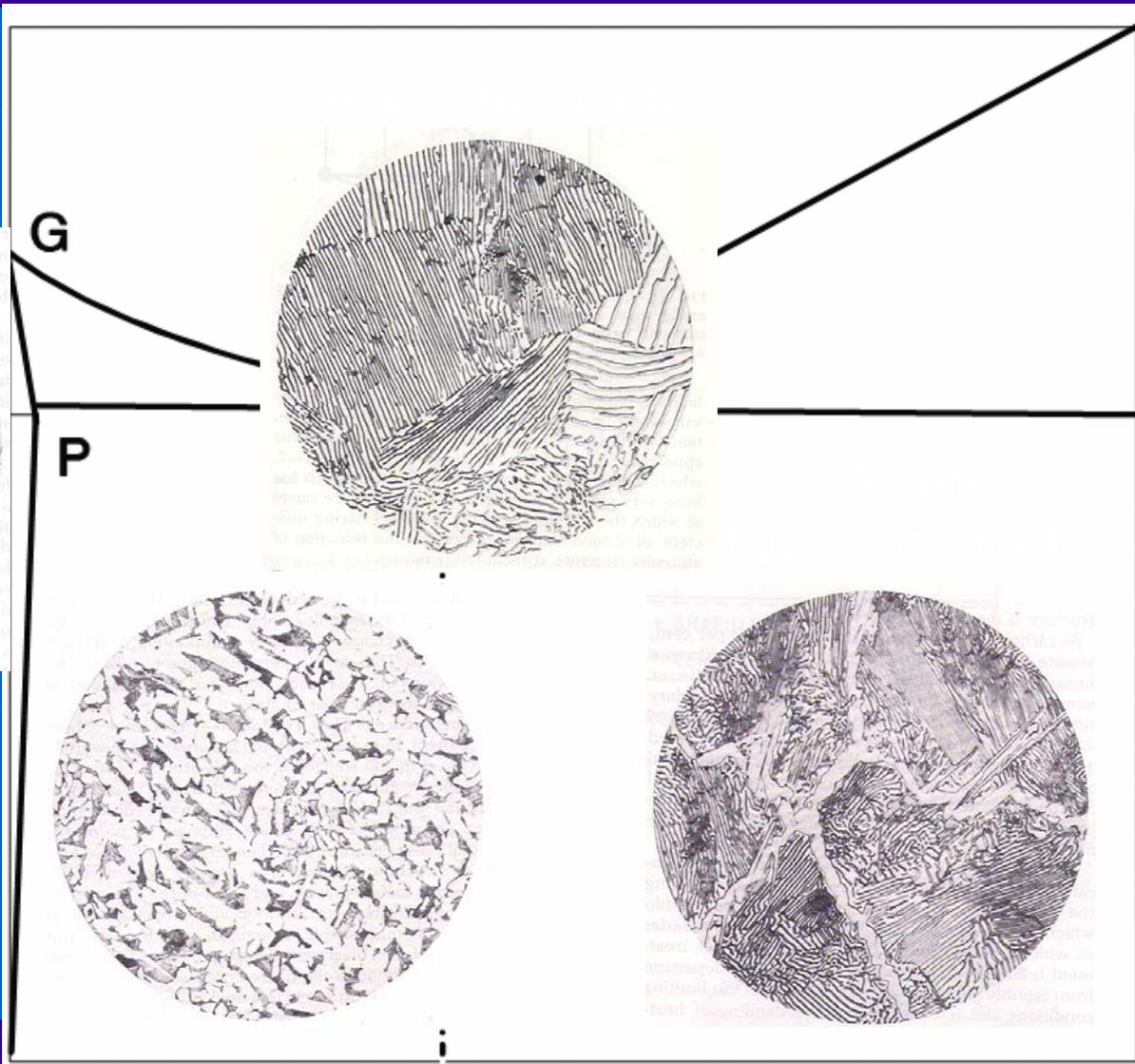


Les aciers

Aciers ferritiques



Aciers
hypoeutectoïdes



E (2,06)

Propriétés de la ferrite

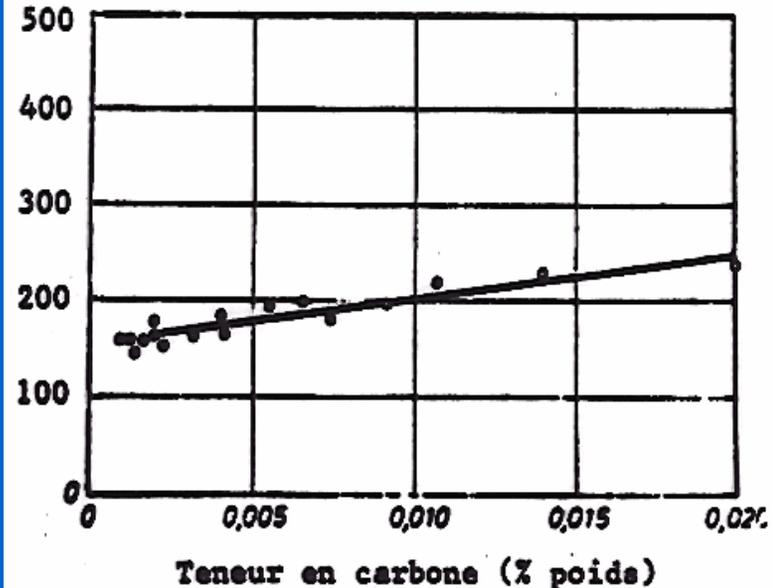
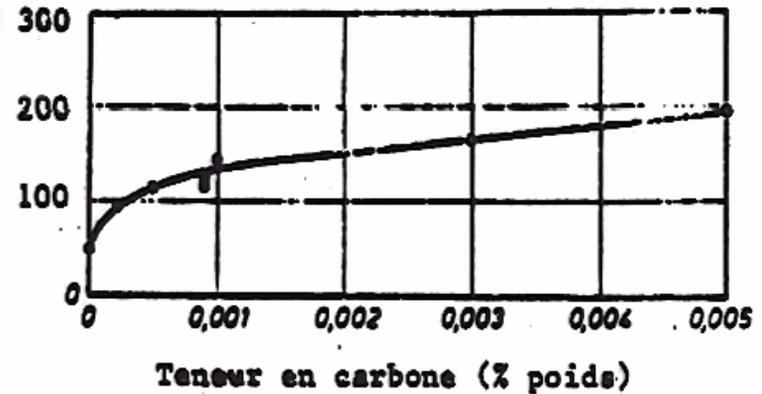
- Pour la ferrite pure recristallisée, on a

$$\sigma = 58 + \frac{9,1}{\sqrt{d(mm)}}$$

soit 87 MPa pour $d=0,1$ mm

- L'effet d'un ajout de carbone est considérable.

Limite élastique (Mpa)



Les aciers

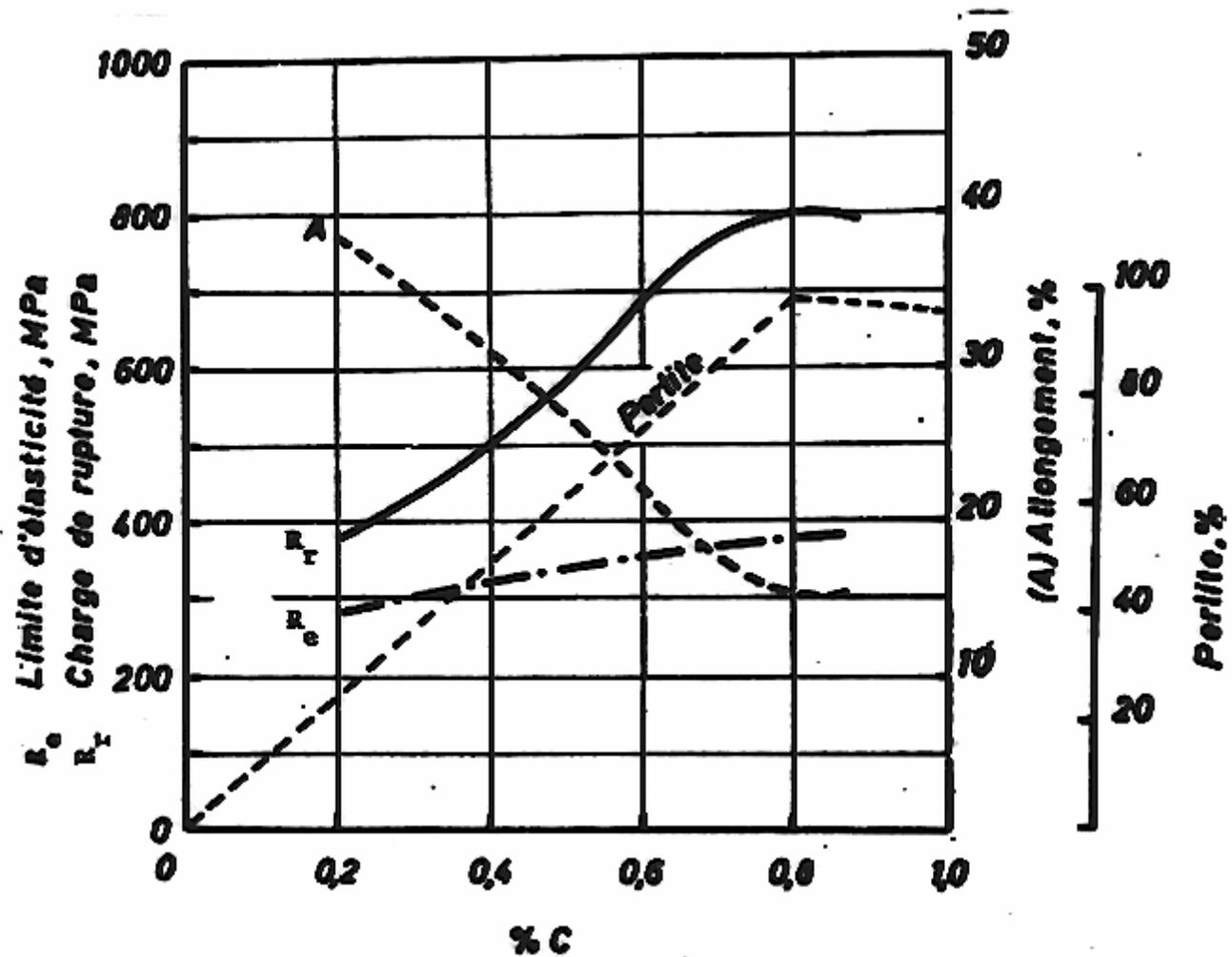
Propriétés des phases remarquables

	Re	Rr	Ar	Dureté
	Mpa	Mpa	%	Brinell
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

Propriétés des aciers

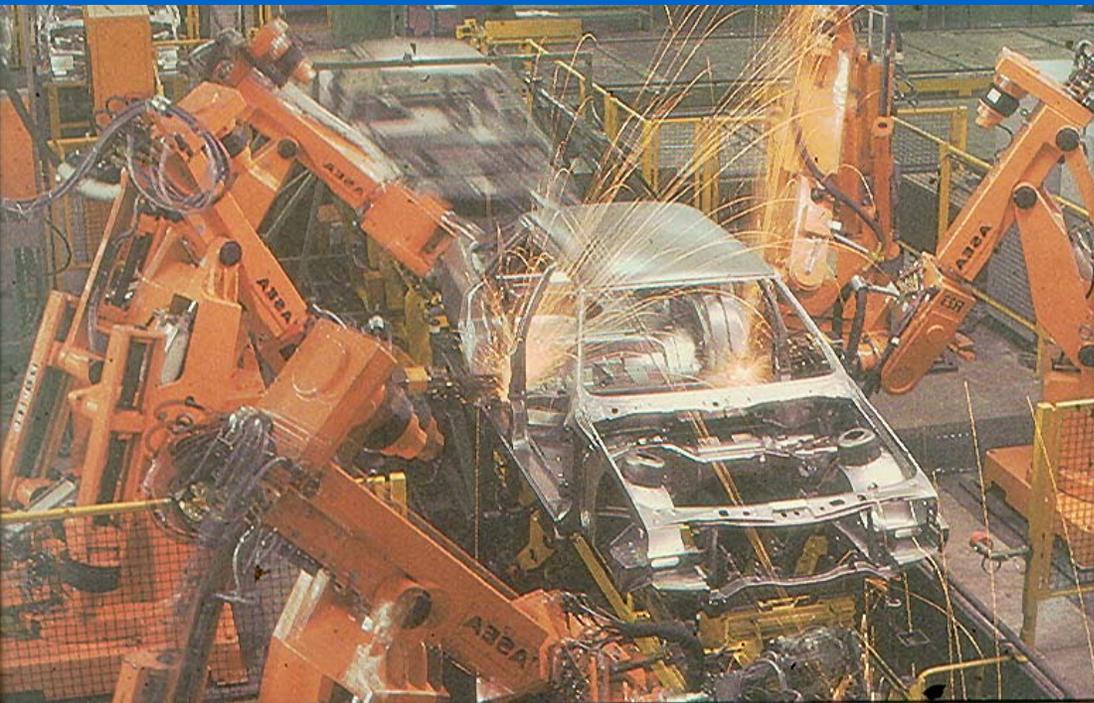
Les propriétés des aciers sont obtenues en faisant des moyennes pondérées des propriétés des phases

- ferrite
- perlite



Utilisation des aciers ferritiques

Principalement utilisés dans les applications qui exigent une grande formabilité.



-
-
-

Utilisation de l'acier perlitique

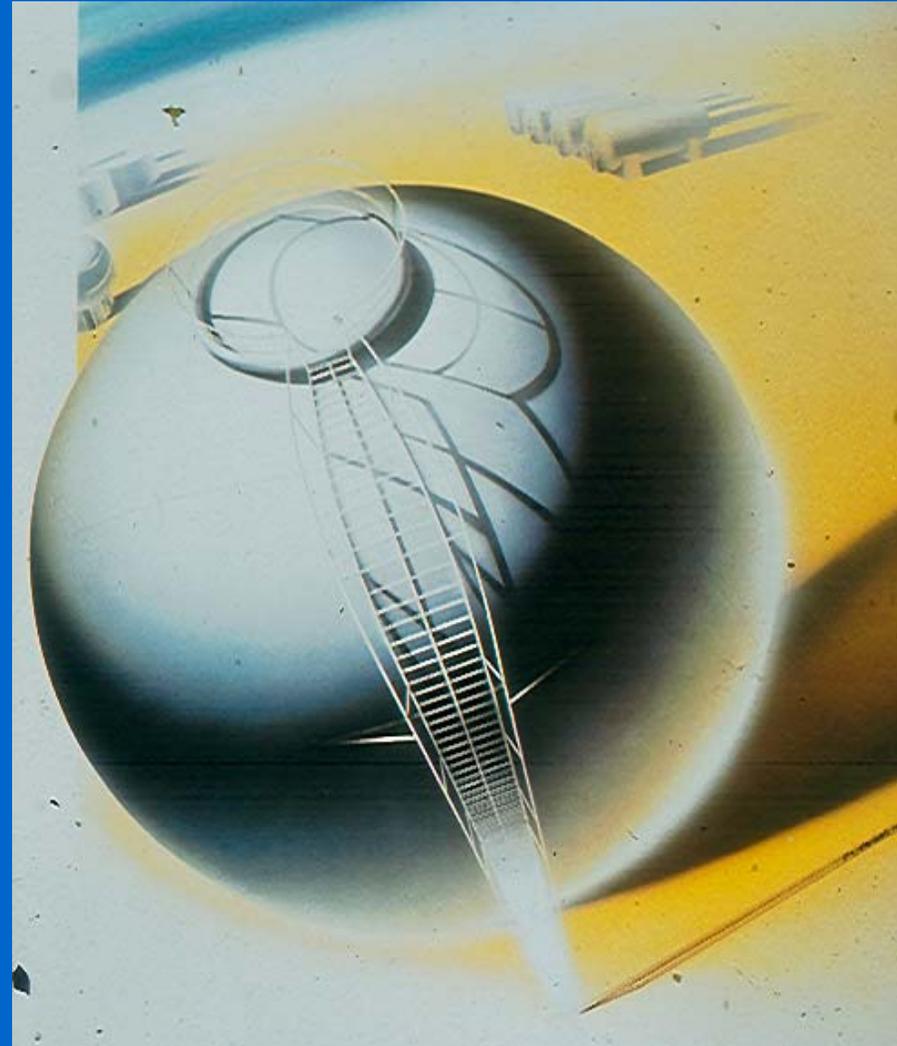
Principalement utilisé dans les applications qui demandent une grande résistance.



-
-
-

Utilisation des aciers hypoeutectoides

Ce sont les aciers de construction.



Les aciers alliés

Re	Rr	Ar
Mpa	Mpa	%

Limite des aciers alliés

2400	2500	6
------	------	---

Amélioration d'autres propriétés mécaniques :
résilience, résistance au fluage, résistance à
l'usure, ...

Amélioration de la résistance à la corrosion

Amélioration de propriétés physiques :
dilatabilité, ...

Les aciers alliés

Eléments en solution

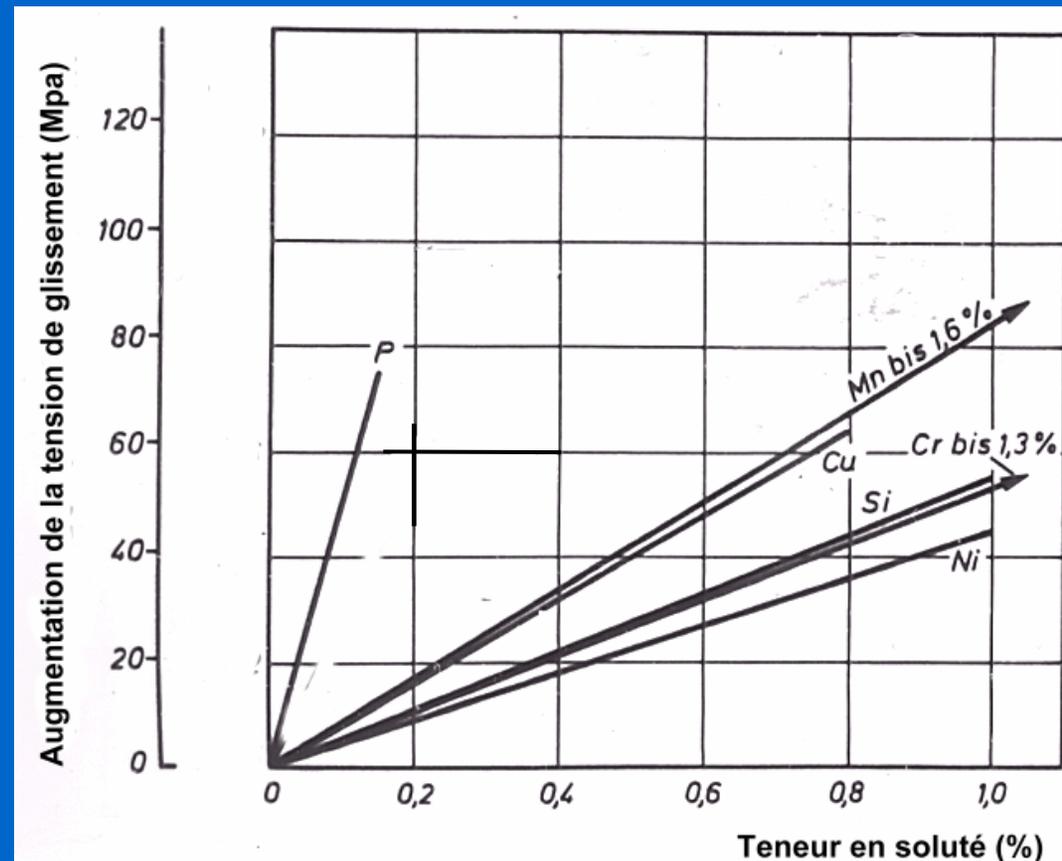
- Eléments en solution

- Alphagènes

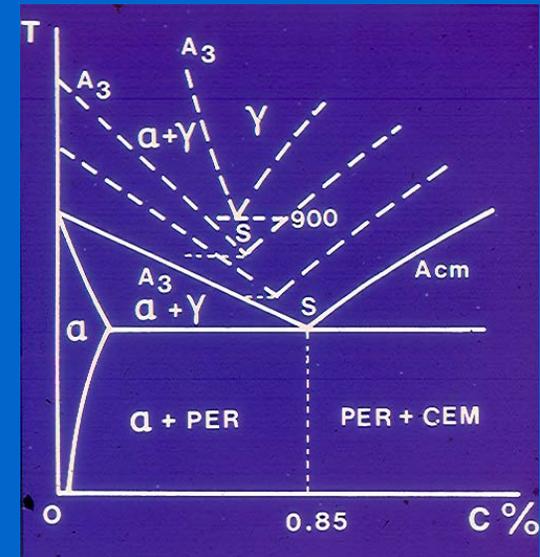
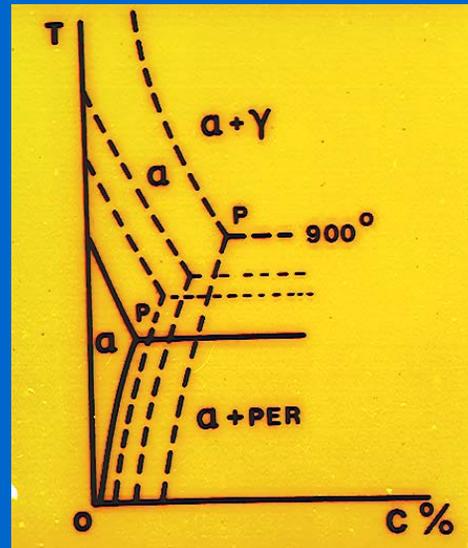
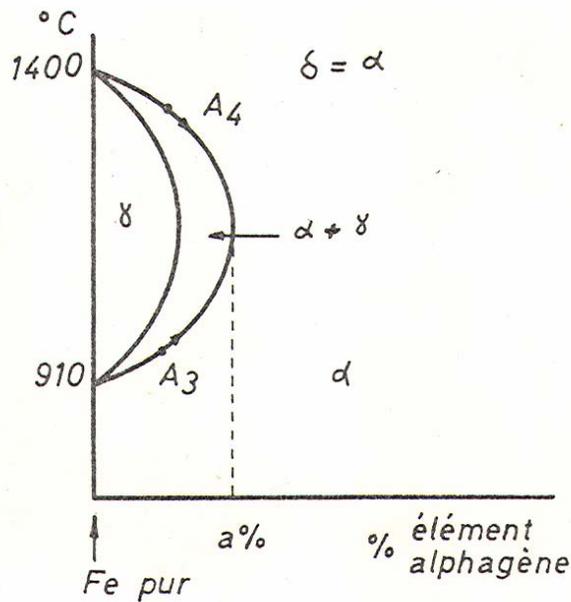
- Al
 - Si
 - Ti, Zr
 - V, Nb, Ta
 - Cr, Mo, W

- Gammagènes

- Mn
 - Co, Ni
 - Cu

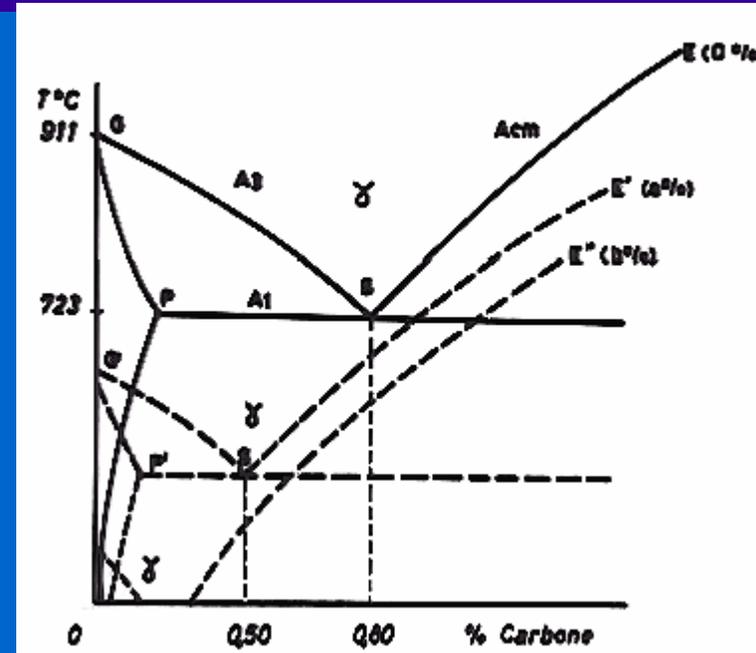
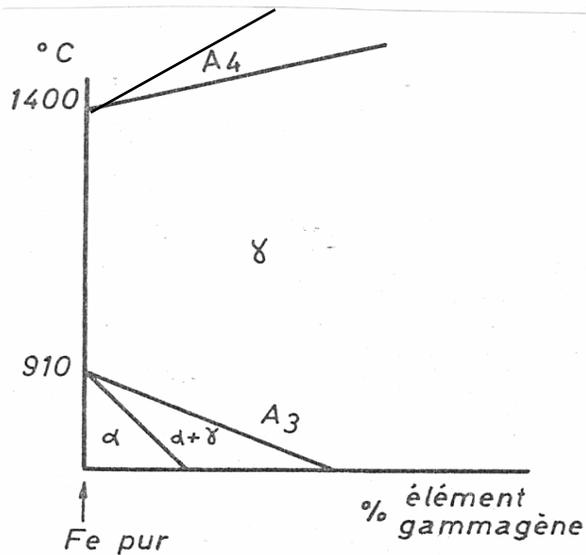


Éléments alphagènes



- Les éléments alphagènes remontent la température
 - de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$
 - Eutectoïde
- Les éléments alphagènes augmentent la solubilité du carbone dans le fer alpha

Éléments gammagènes



- Les éléments gammagènes baissent la température
 - de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$
 - Eutectoïde
- Les éléments gammagènes augmentent la solubilité du carbone dans le fer alpha

Les aciers alliés

Combinaisons intermétalliques - carbures

Carbures simples

- Ti, Zr : TiC, ZrC très stables, réseau cubique
- Nb, V : NbC, VC stables, réseau cubique
- Cr, Mo, W : assez stables, plusieurs formules

Carbures mixtes

- (Fe, Cr)₃C
- (Fe, Mn)₃C : pas très stables

Propriétés des carbures simples

- précipitations plus abondantes, plus fines
- plus durs (carbures de tungstène)
- carbures plus ronds (moins de fragilité qu'avec les aiguilles)

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

Les aciers alliés

Combinaisons intermétalliques : autres

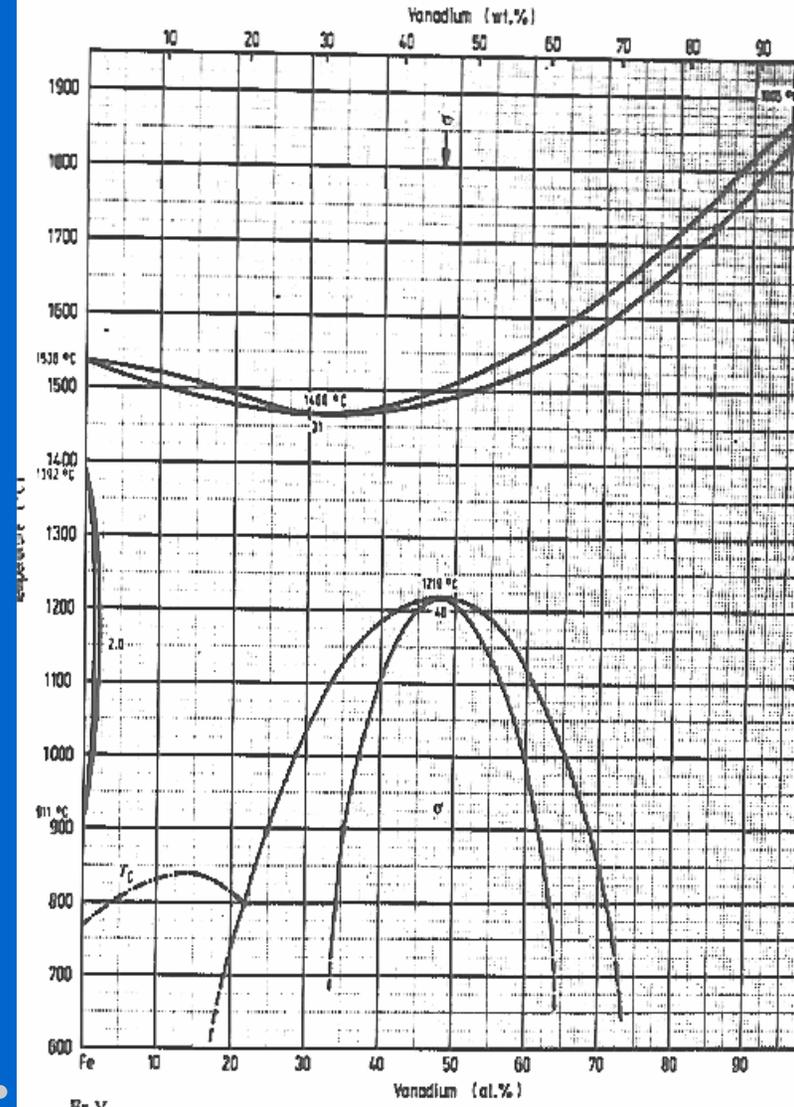
- Nitrures : les mêmes
 - Ti, Zr
 - V, Nb
 - Cr, Mo, W
 - + Al
- Carbonitrures

Les aciers alliés

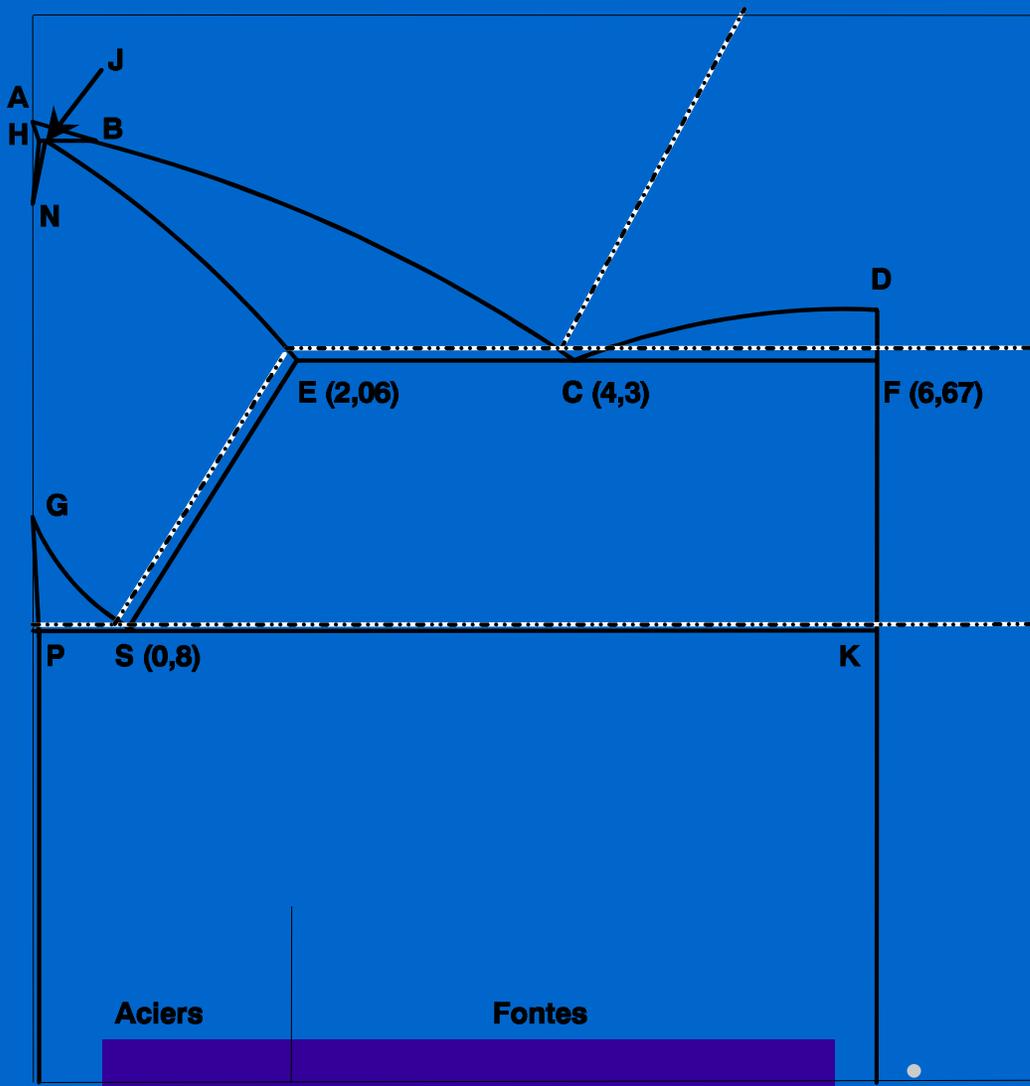
Combinaisons intermétalliques : à éviter

Combinaisons Fe_nX_m

- Phases σ très fragiles
- A éviter absolument



Les 3 types de fontes

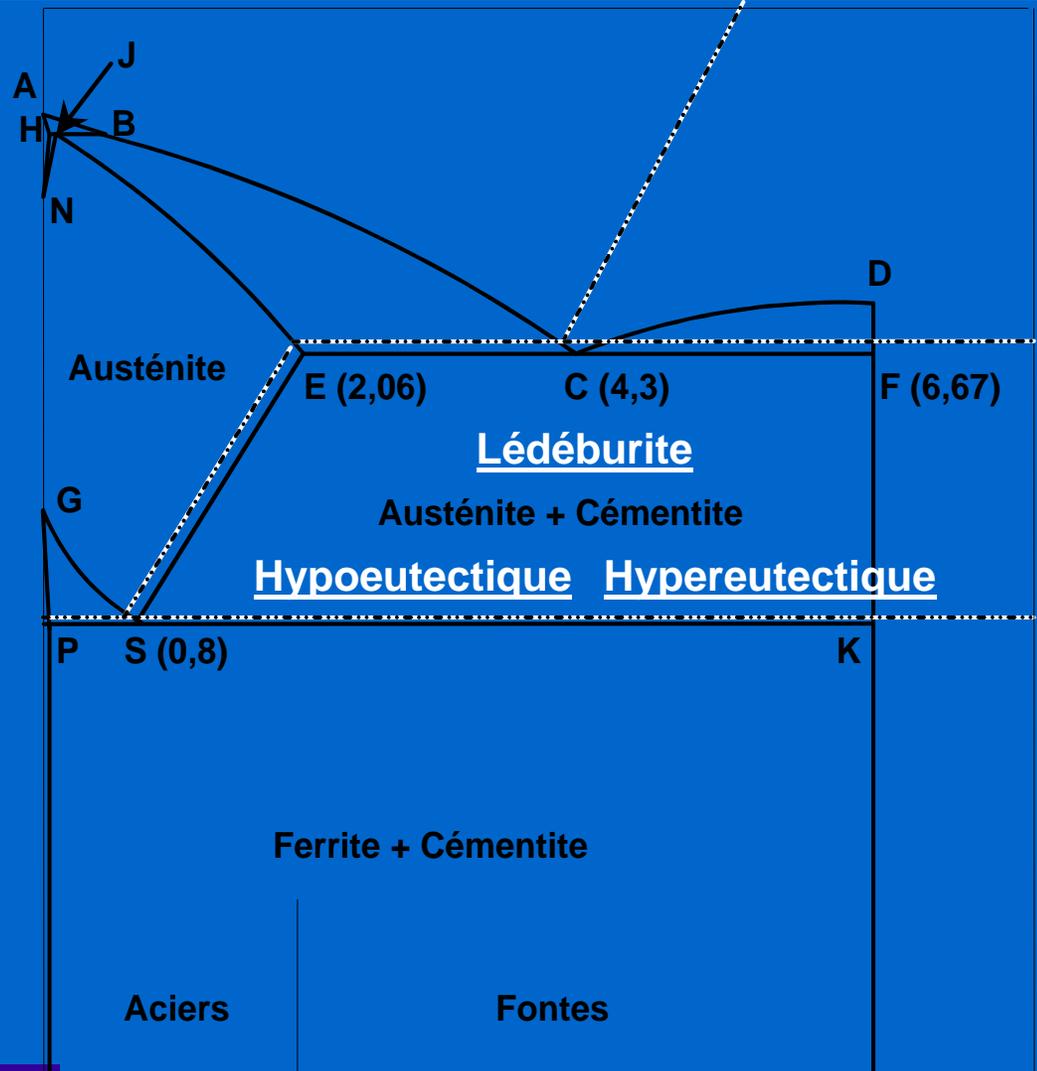
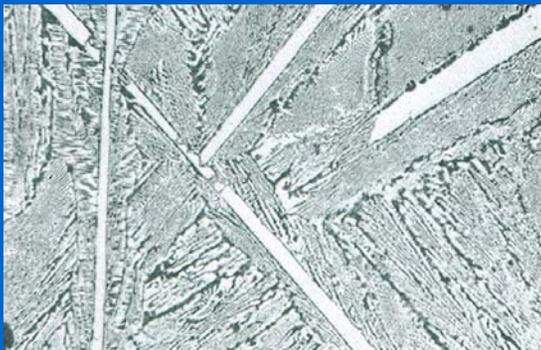
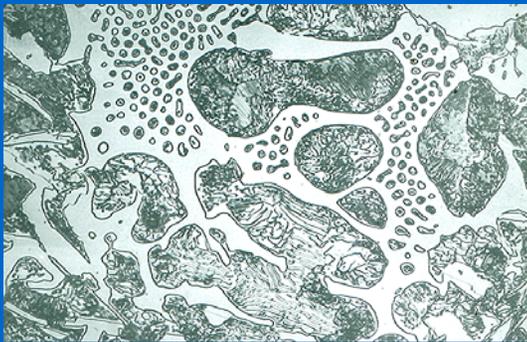


1. Fontes blanches
fer-cémentite

2. Fontes malléables
fer-graphite

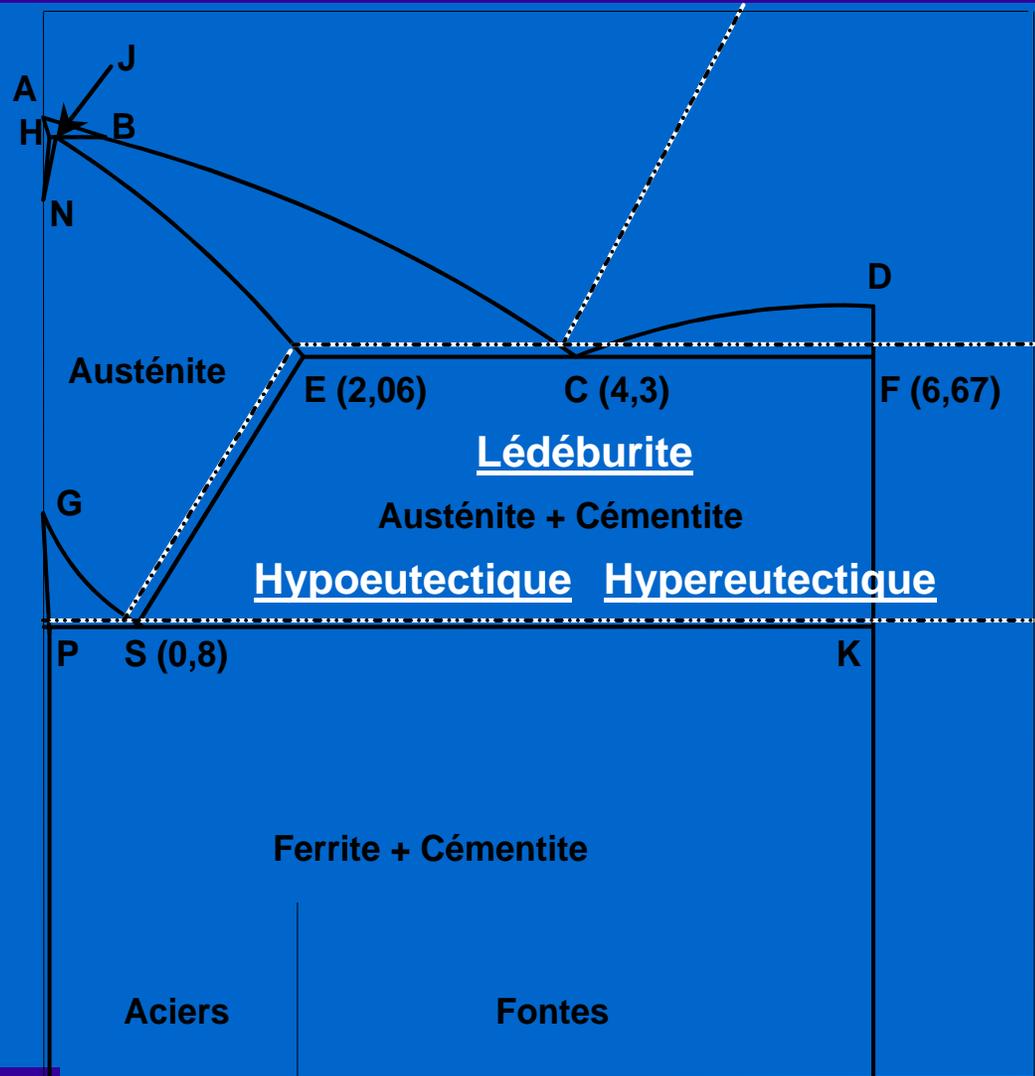
3. Fontes grises
solidification fer-graphite
transformations allotropiques
fer-cémentite

Les Fontes Blanches



Les Fontes Blanches

- Refroidissement rapide
- Pas d'éléments graphitisants
- Présence de stabilisateurs de cémentite

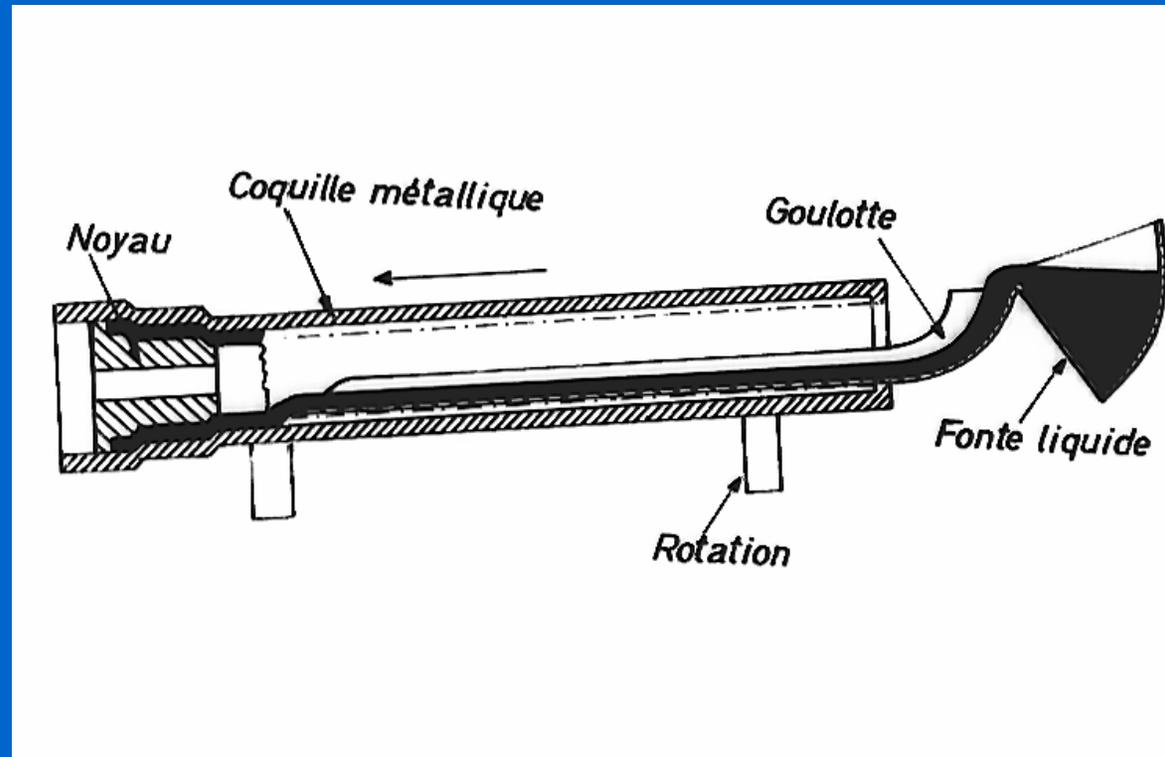


Propriétés des fontes blanches

Majoritairement constituées de cémentite, elles sont

- dures
- fragiles

Utilisées en surface des pièces soumises à usure.

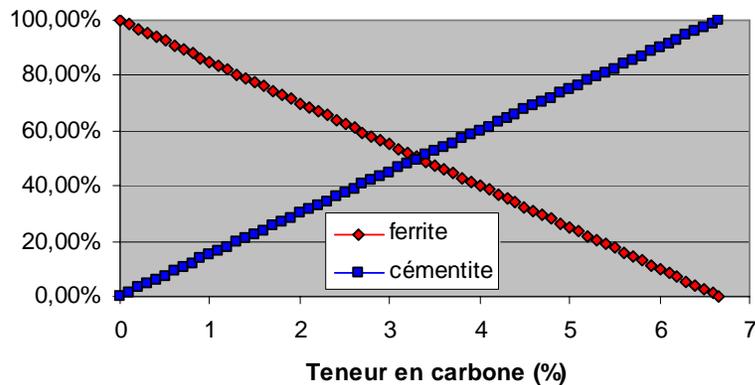


Fontes coquillées

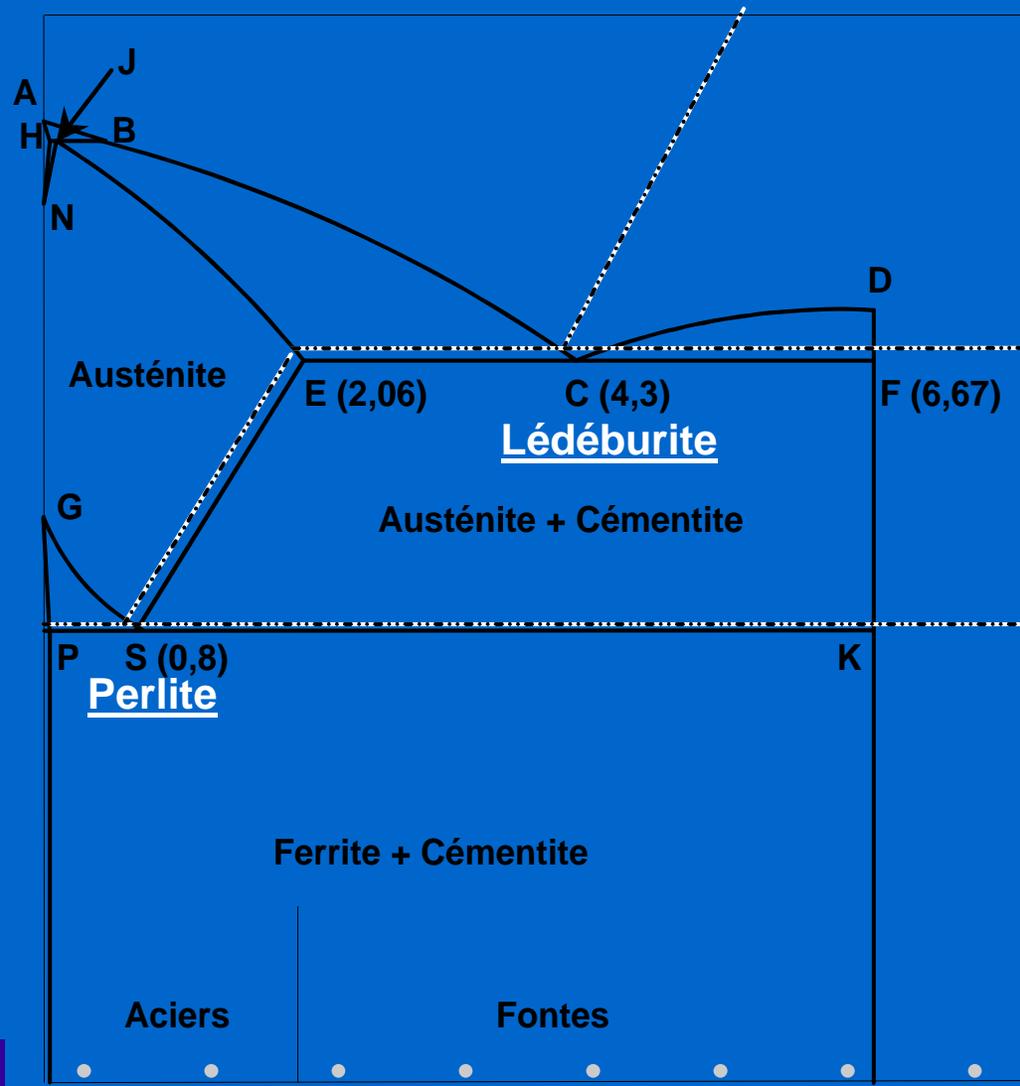
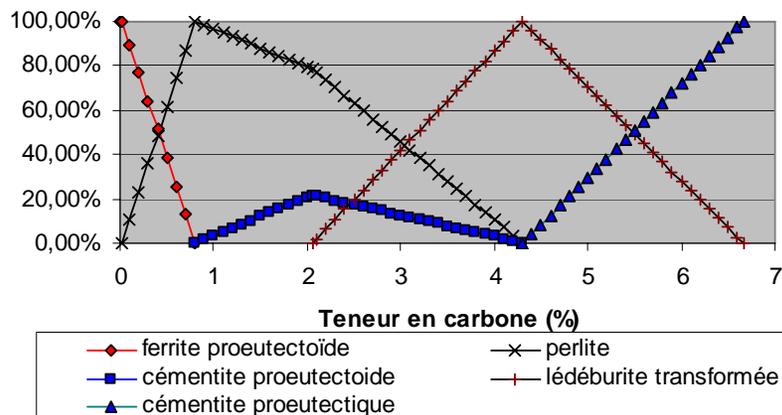
Le diagramme fer-cémentite

Les aciers et les fontes blanches

Phases en présence



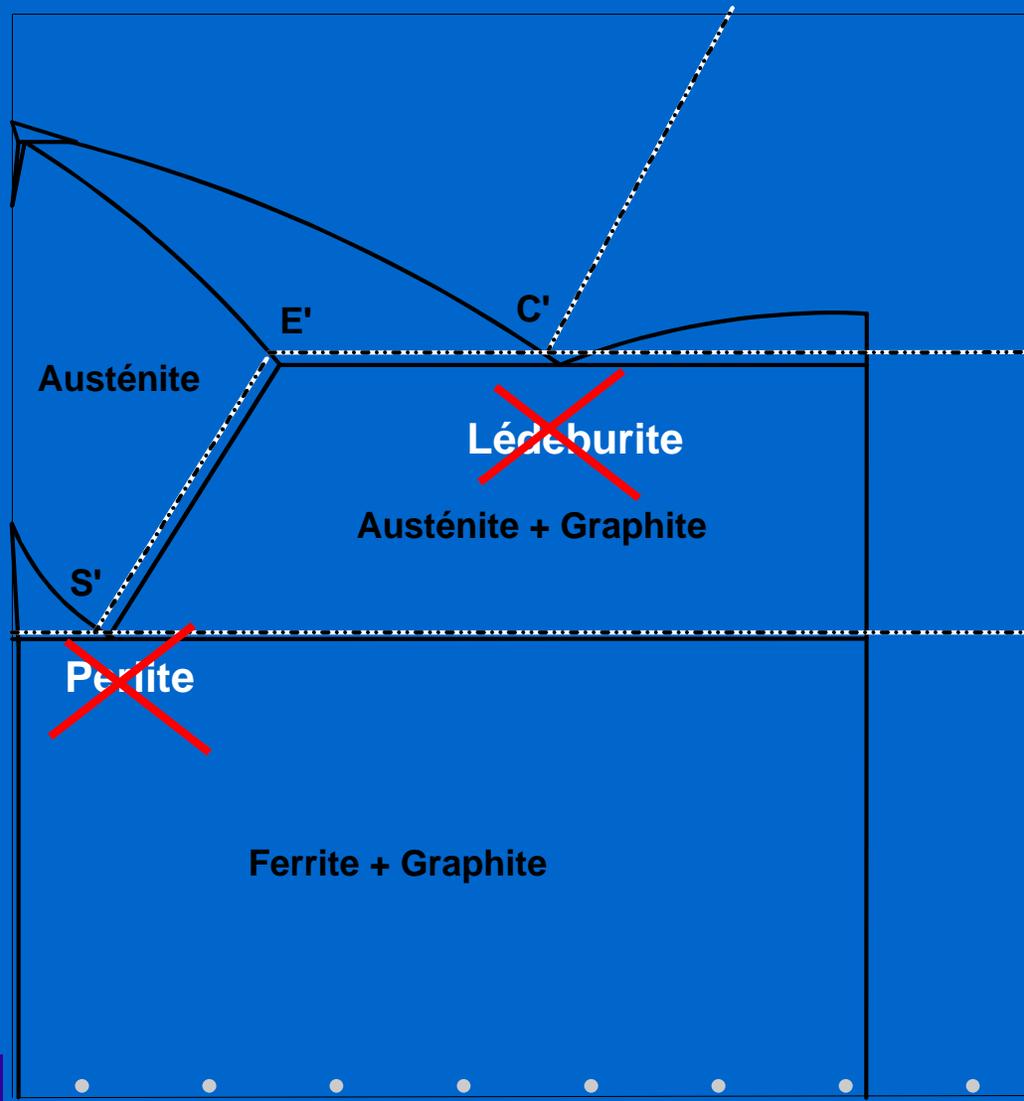
Phases en présence



Le diagramme fer - graphite

Les fontes malléables

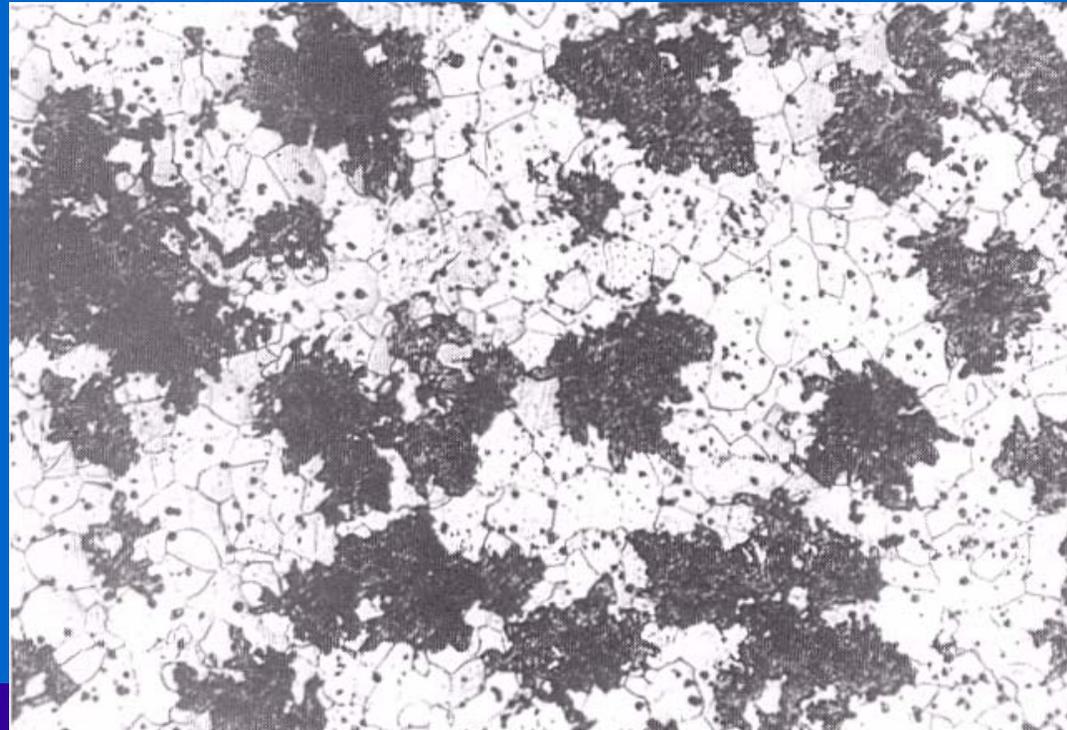
- Pas de production directe
- Mise à l'équilibre de fontes blanches



Les Fontes Malléables

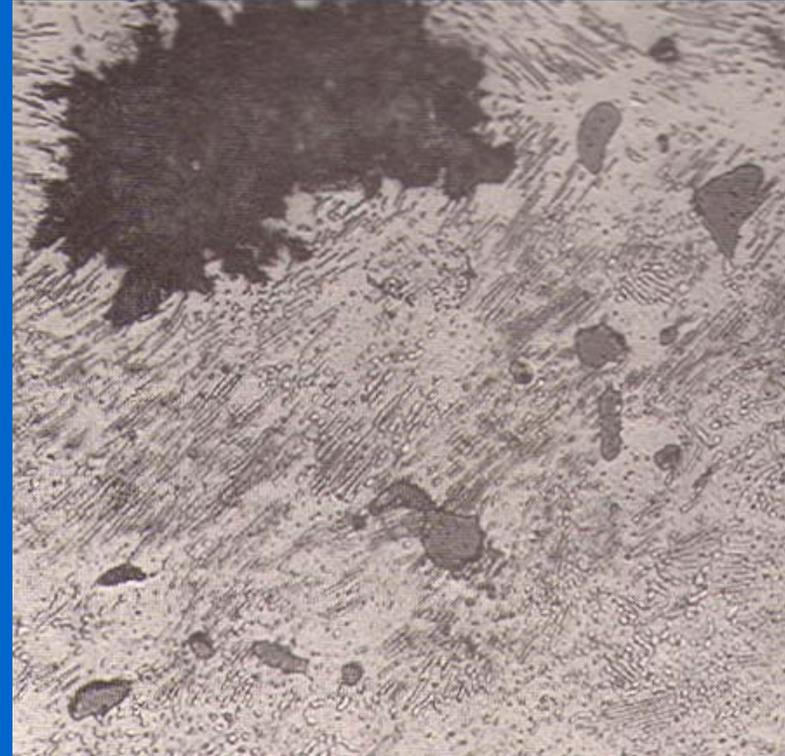
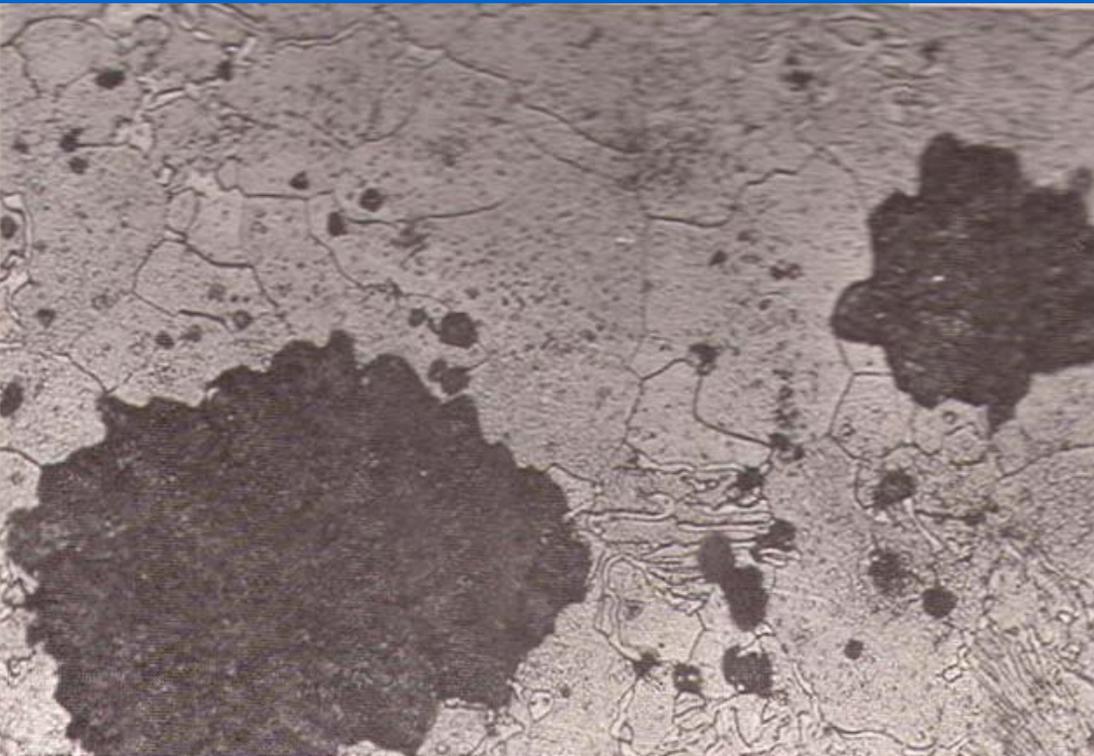
Procédé américain

- Décomposition cémentite à 950° C : $\text{Fe}_3\text{C} \rightsquigarrow 3 \text{Fe}_\gamma + \text{C}_{\text{graphite}}$
- Refroidissement très lent 10°C/h puis 1°C/h
- Résultats : ferrite + graphite



Les Fontes Malléables

- Résultats : ferrite + graphite
- Défauts : présence de cémentite et/ou de perlite



Propriétés mécaniques des fontes malléables

- La microstructure est constituée
 - majoritairement de ferrite
 - minoritairement d'amas de graphite

	Rr	Ar	Dureté
	Mpa	%	Brinell
Ferrite impure	300	40	80
Fonte malléable (américaine)	275-300	6-18	110-160

La dispersion des propriétés provient de la présence éventuelle de défauts

Les Fontes Malléables Européennes

Procédé européen

- Décomposition cémentite à 950° C en atmosphère oxydante



- Refroidissement plus rapide
- Produit hétérogène
 - surface : ferrite (μ structure à cœur blanc)
 - cœur : ferrite + graphite (+cémentite+perlite)

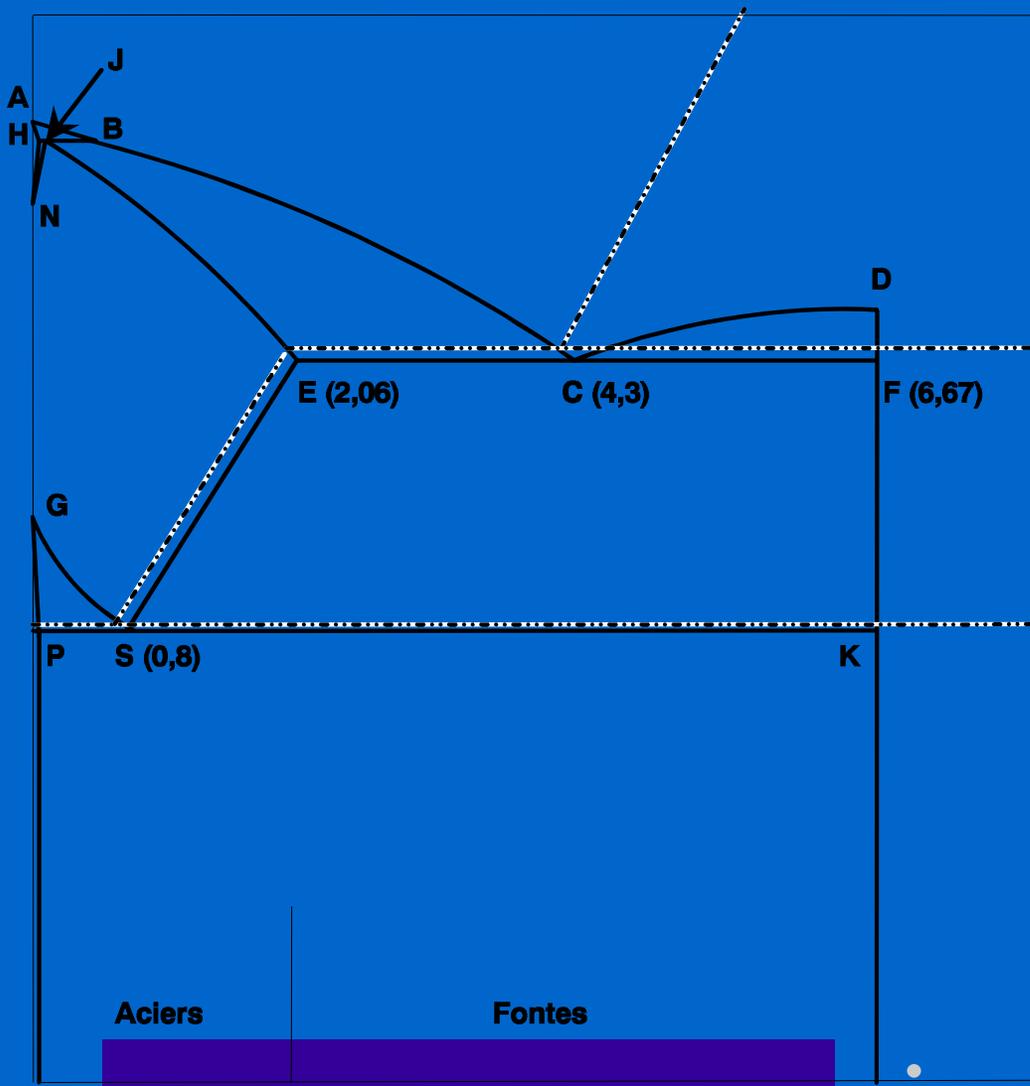


Propriétés mécaniques des fontes malléables

	Rr Mpa	Ar %	Dureté Brinell	Résilience J/cm ²
Ferrite impure	300	40	80	300
Fonte malléable (américaine)	275-300	6-18	110-160	30
Fonte malléable (européenne)	300-375	5	100-130 surface 150-200 coeur	-

Le procédé européen est principalement appliqué aux pièces peu épaisses.

Les 3 types de fontes



1. Fontes blanches
fer-cémentite

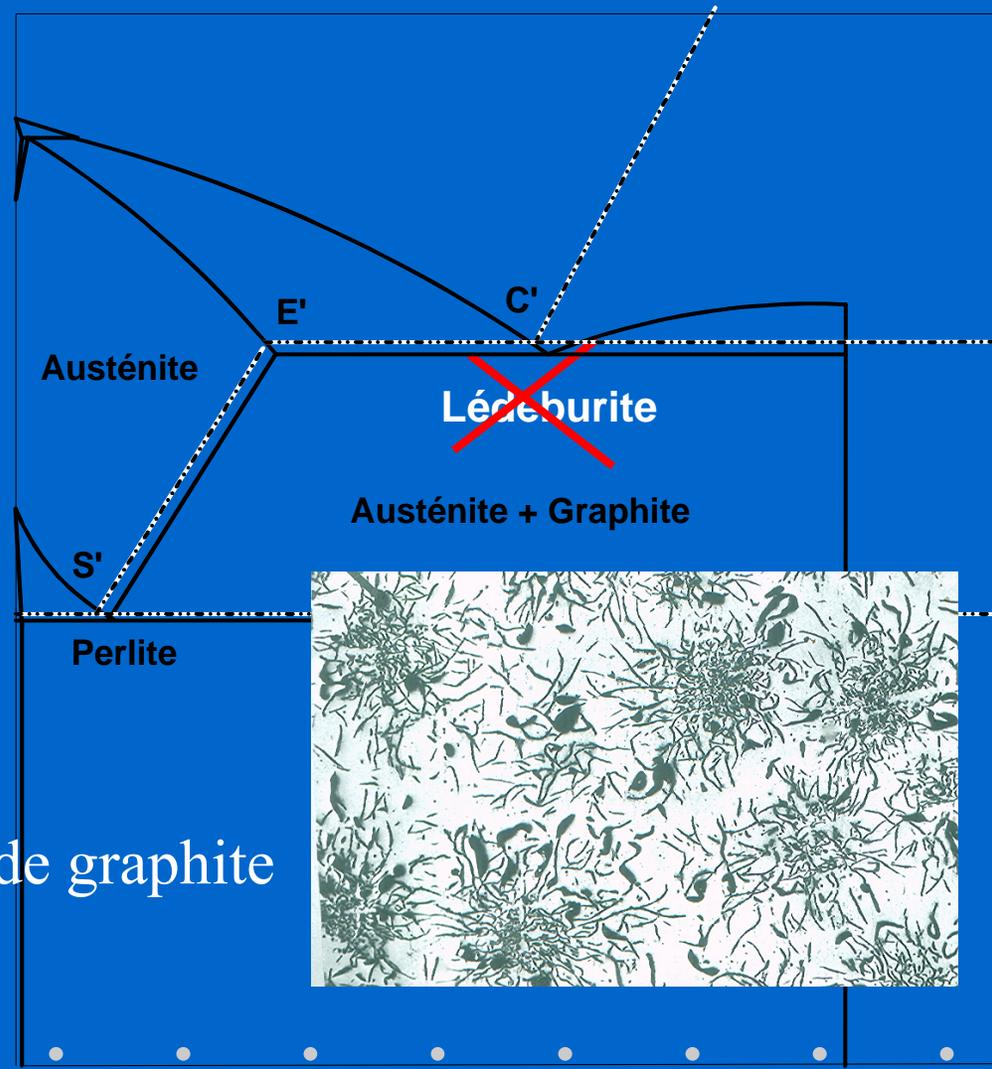
2. Fontes malléables
fer-graphite

3. Fontes grises
solidification fer-graphite
transformations allotropiques
fer-cémentite

Les fontes grises.

Solidification dans le diagramme stable

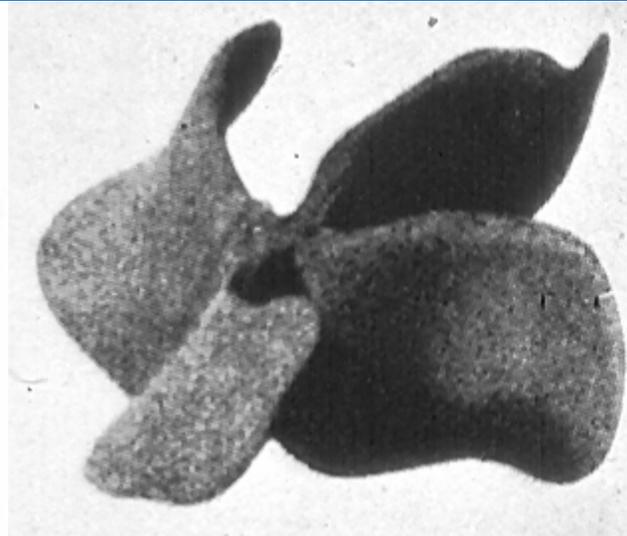
- Température de coulée élevée.
- Refroidissement lent.
- Eléments graphitisants (C élevé, Si).
- Pas de stabilisateurs de cémentite.



Les fontes grises – rosettes de graphite

Rosettes de graphite

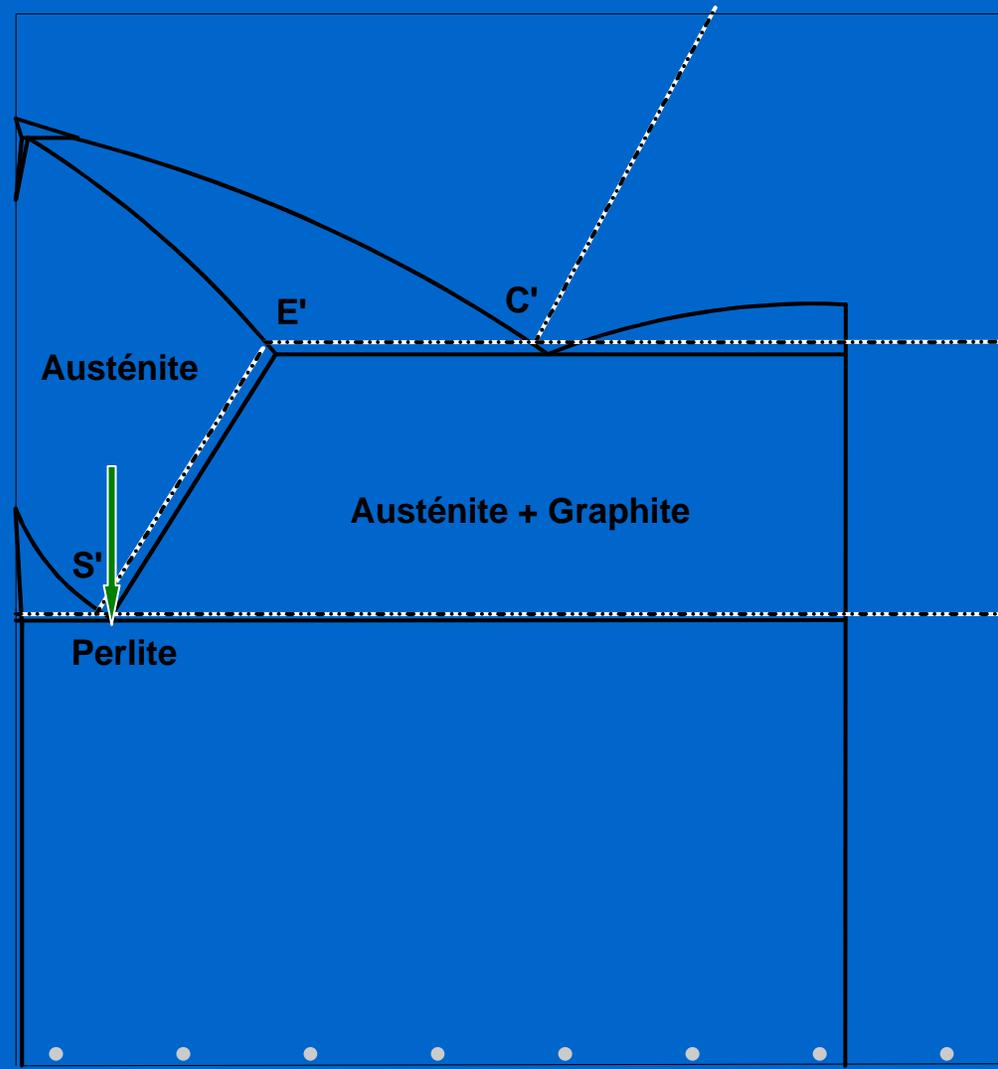
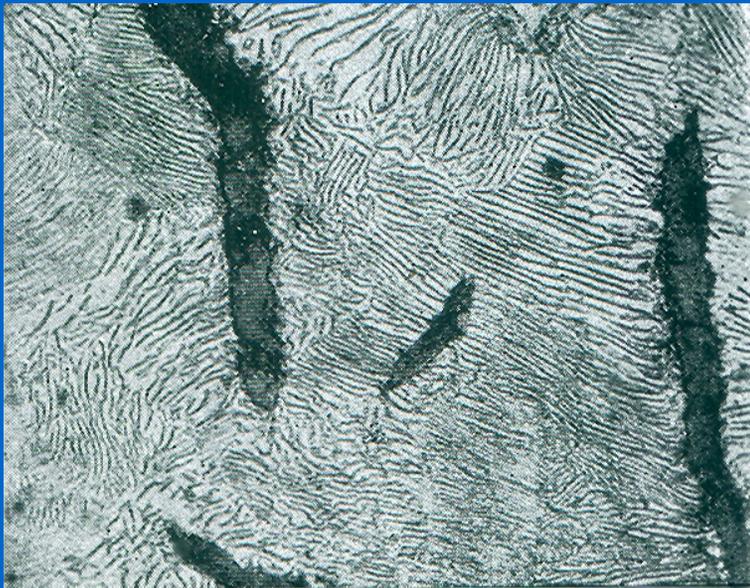
- Graphite lamellaire
- Lamelles entrelacées



Les fontes grises.

Passage d'un diagramme à l'autre.

Graphite + Perlite
Fonte grise perlitique

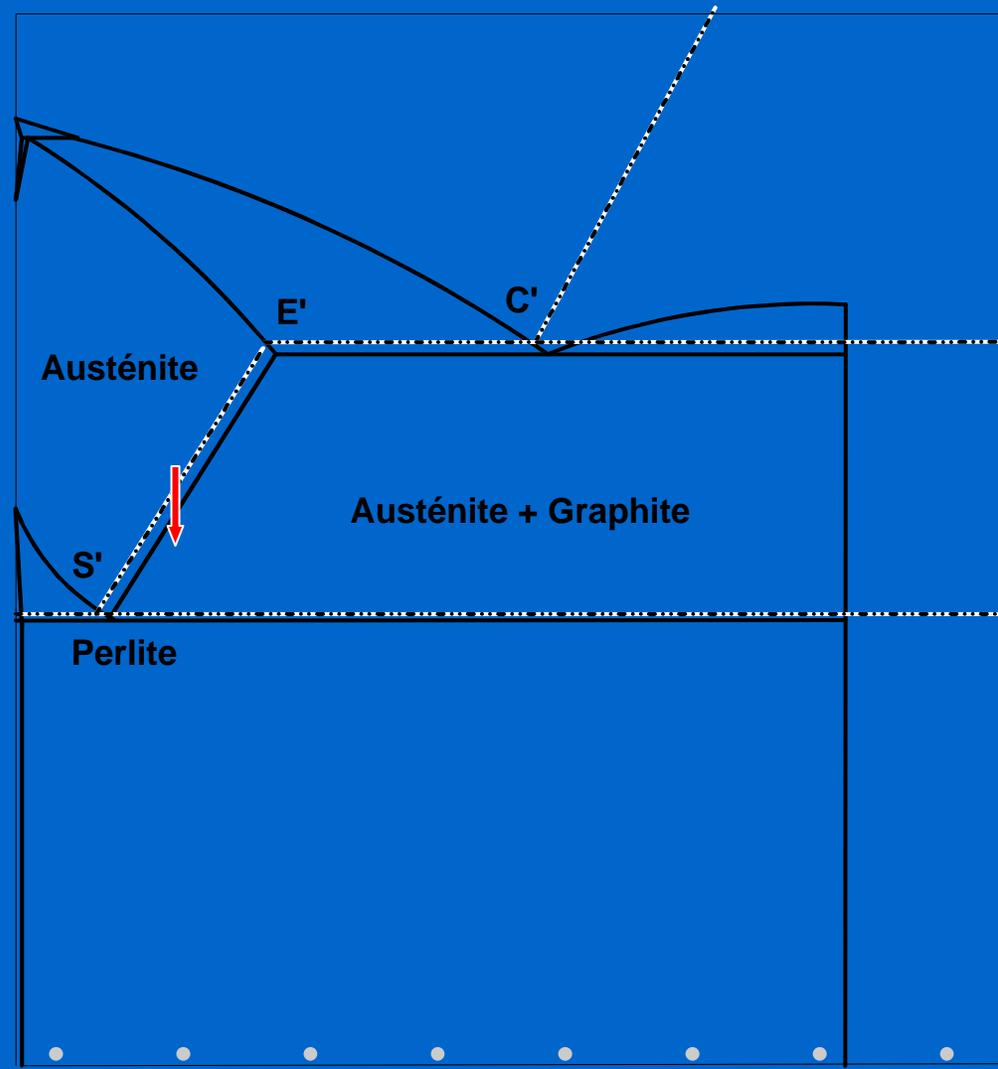


Les fontes grises.

Passage d'un diagramme à l'autre.

Graphite + Perlite
Fonte grise perlitique

Graphite + Perlite +
Cémentite proeutectoïde



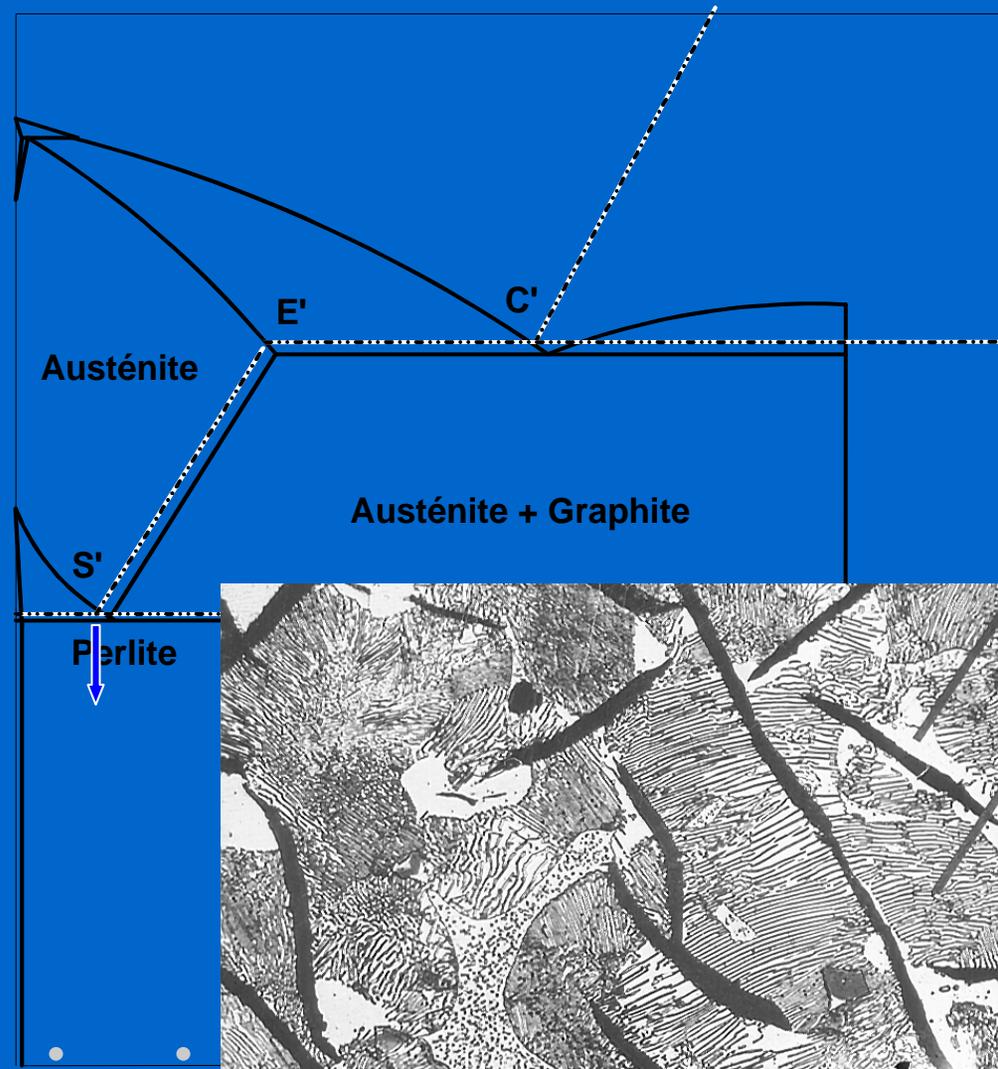
Les fontes grises.

Passage d'un diagramme à l'autre.

Graphite + Perlite
Fonte grise perlitique

Graphite + Perlite +
Cémentite proeutectoïde

Graphite + Perlite +
Ferrite proeutectoïde



Propriétés des fontes grises perlitiques.

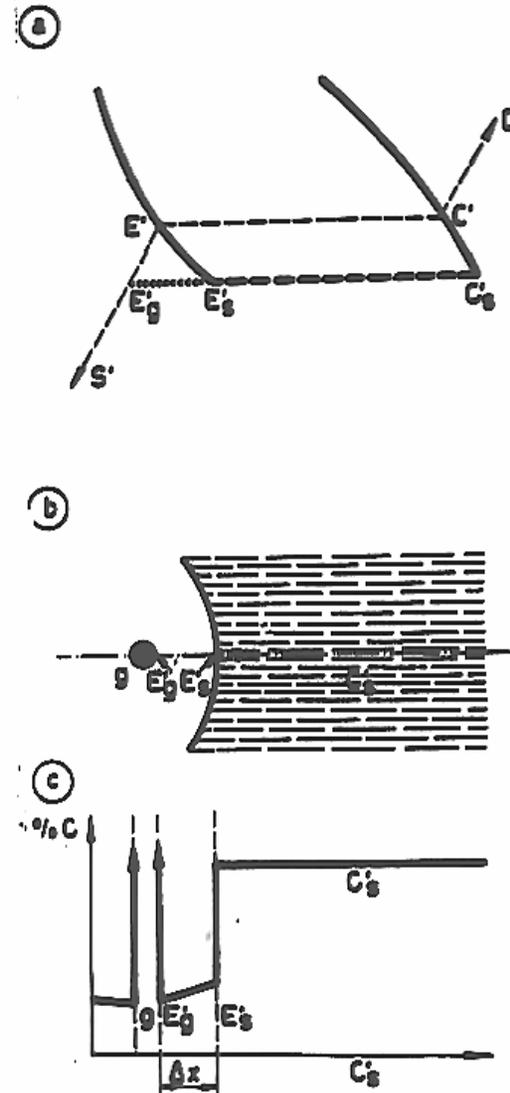
Les fontes grises perlitiques sont constituées

- majoritairement de perlite
- minoritairement de graphite lamellaire

	Rr Mpa	Ar %	Dureté Brinell	Résilience J/cm²
Perlite moyenne	850	15	200	200
Fonte grise perlitique (lamellaire)	275-300	0-1	200	médiocre
Fonte grise perlitique (nodulaire)	400-700	4-5	220	bonne

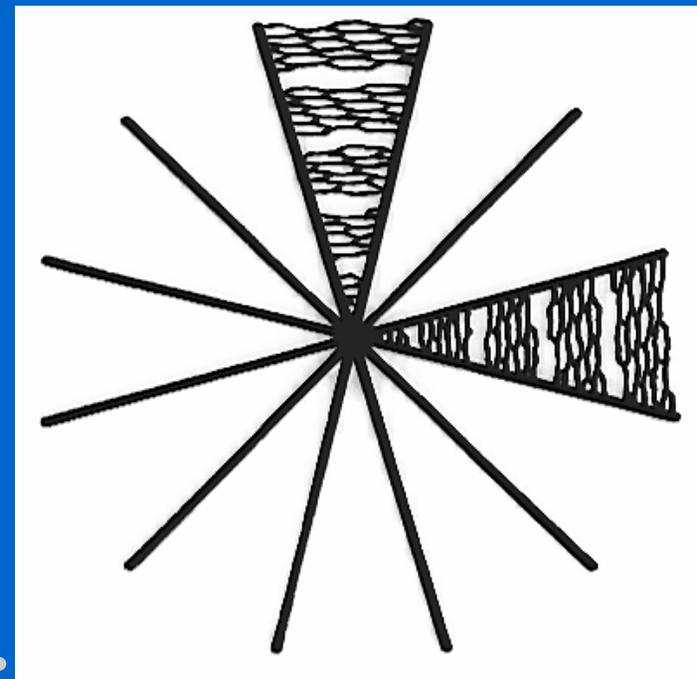
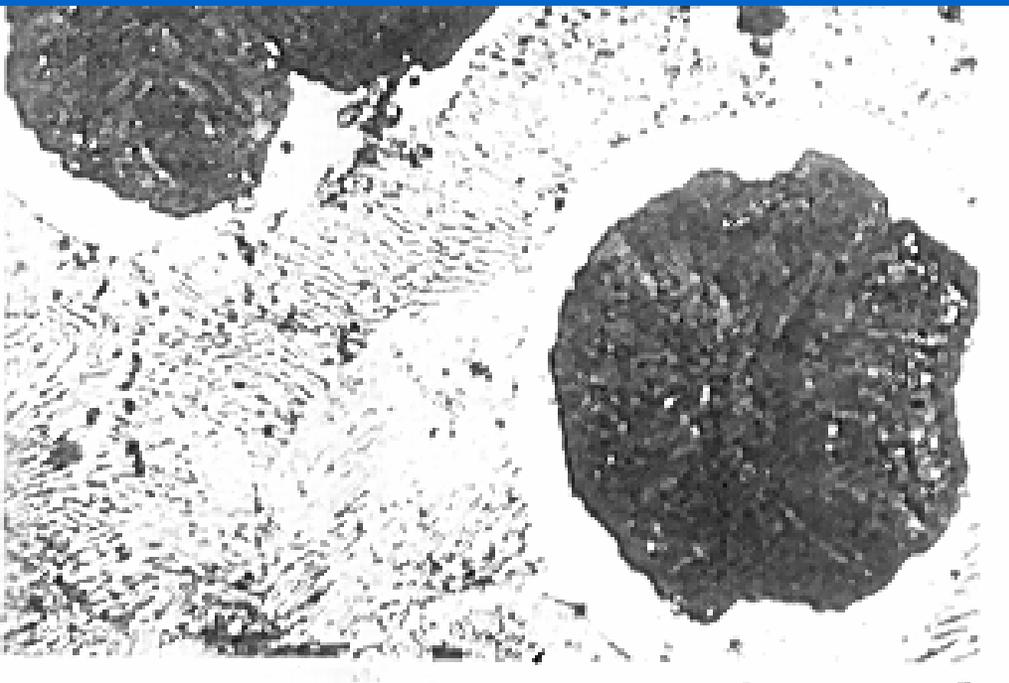
Réalisation des fontes grises nodulaires.

- Elles sont réalisables au partir de fontes hypoeutectiques en empêchant la formation de l'eutectique :
empoisonnement des germes (par exemple par Mg)
- Il se produit une surfusion (existence d'un liquide en dessous de la température de solidification)
- On forme ainsi de l'austénite sursaturée en carbone
- Cette austénite se désature en donnant naissance à des nodules de graphite.



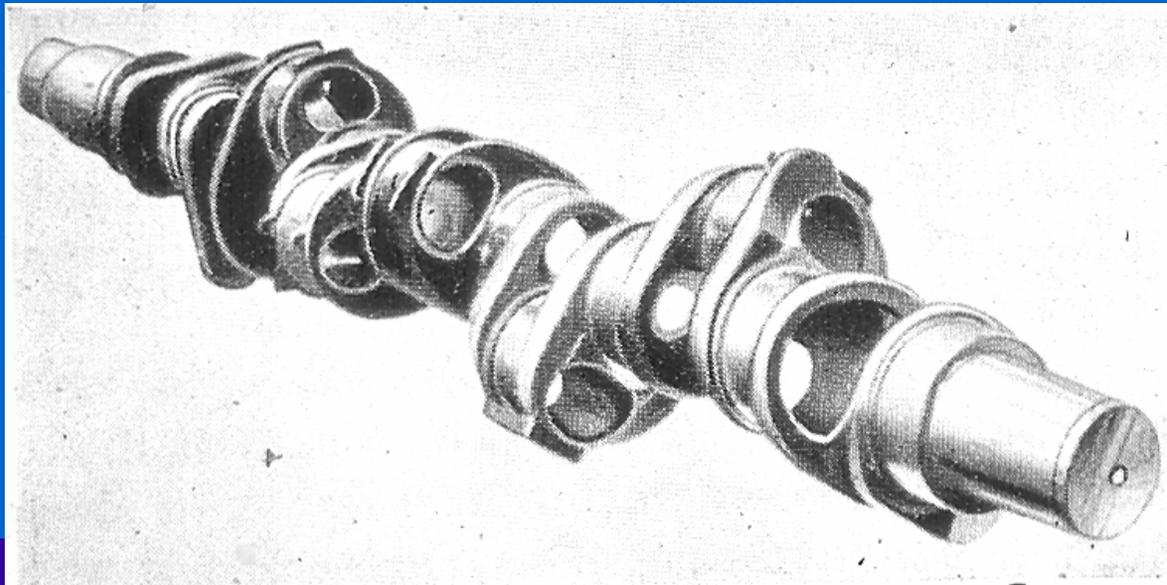
Réalisation des fontes grises nodulaires.

- Les nodules de graphite sont en fait constitués d'un amoncellement de petites lamelles de graphite orientées perpendiculairement aux rayons du nodule.
- Ceci résulte de leur formation dans un solide avec diffusion suivant tous les rayons.



Utilisation des fontes grises nodulaires.

- Outre de bonnes propriétés mécaniques, les fontes grises nodulaires ont beaucoup d'avantages
 - bonne usinabilité (lubrification par le graphite)
 - bonne étanchéité
 - bonne résistance aux chocs thermiques
- Elles sont très utilisées en mécanique



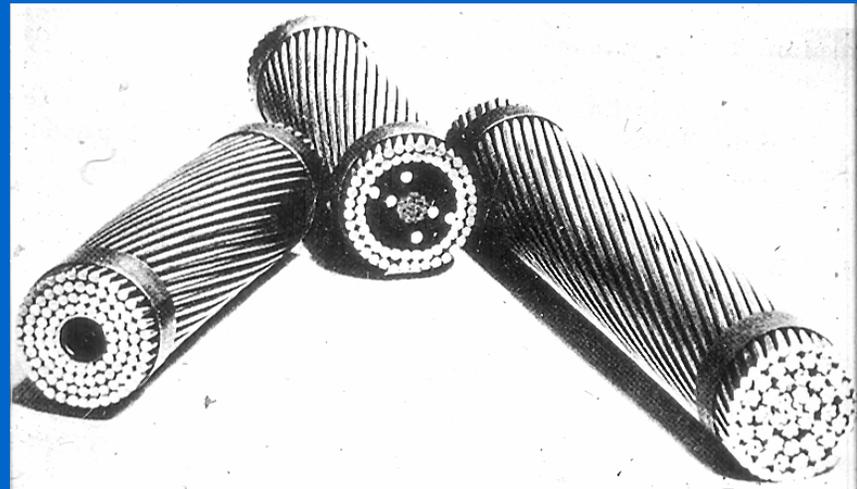
Application

1. Les alliages fer-carbone
2. Les alliages d'aluminium



L'aluminium

- Cubique faces centrées
- Point de fusion 660°C
- Masse volumique 2700 kg/m³
- Bon conducteur de la chaleur et de l'électricité.
- Très réfléchissant.



L'aluminium

- Métal très réactionnel.
- Bonne passivation par Al_2O_3 lorsqu'il est pur



Propriétés mécaniques de l'aluminium

	Re	Rr	Ar
	Mpa	Mpa	%
Ferrite pure	100	200	50
Ferrite impure	200	300	40
Aluminium pur (99,99%)	10	50	60
Aluminium impur (99%)	35	90	35
Aluminium impur à 150° C	30	60	45

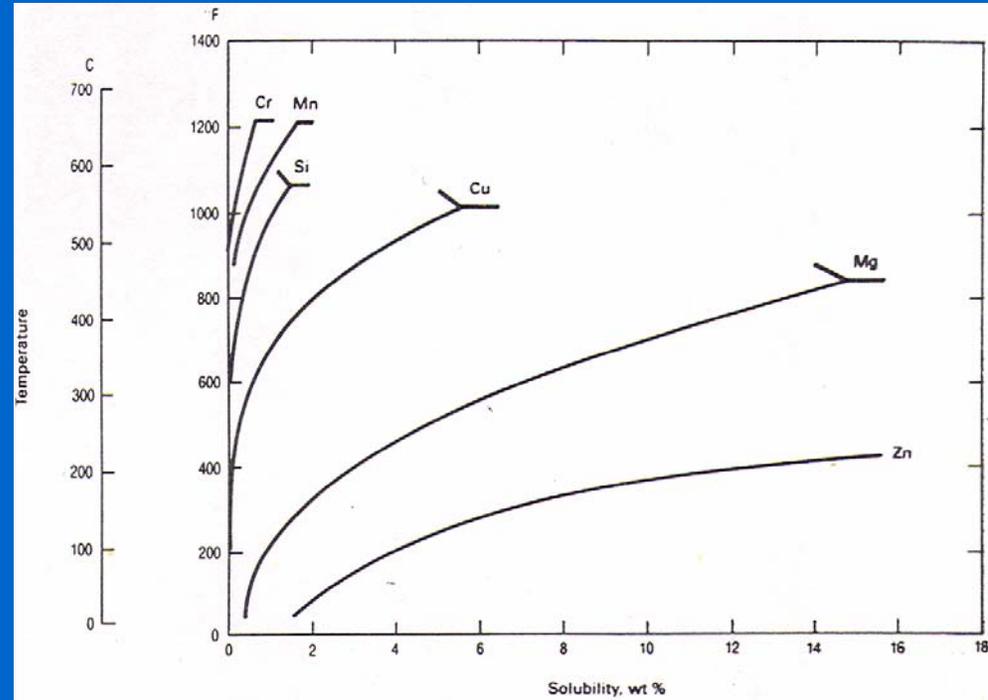
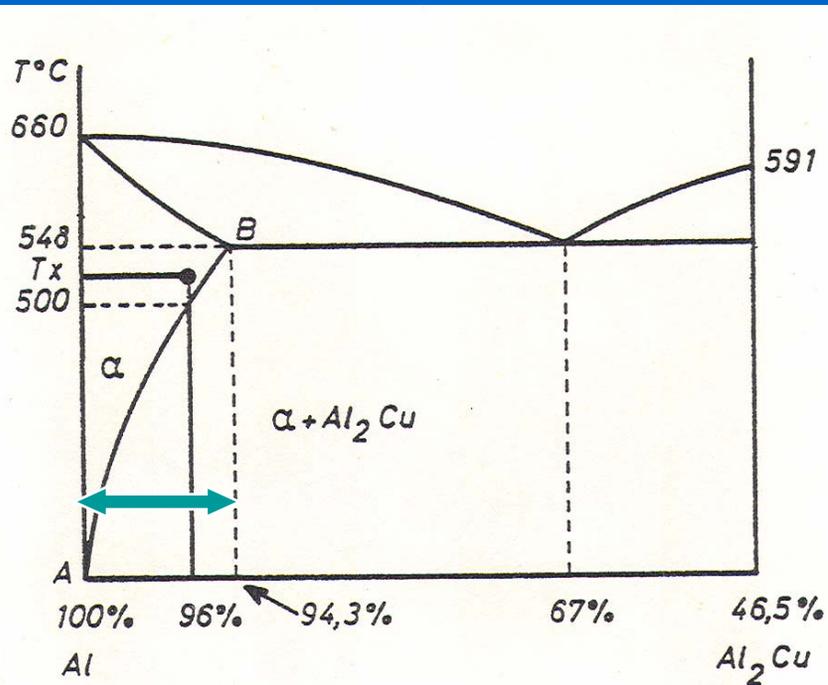
Renforcement des propriétés de l'aluminium.

$$R_e = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} + \sum_i a_i [A_i \%] + \alpha G b \sqrt{\rho} + \sum_j \frac{c_j G b (f_j)^{1/3}}{d_j}$$

- Durcissement de précipitation.
 - 2xxx : + Cu (duralumins)
 - 3xxx : + Cu/Si/Mg
 - 5xxx : + Mg
 - 7xxx : + Zn
 - 8xxx : + Sn
- Durcissement par affinage des grains (eutectiques Al-Si).

Duralumins

- Application des 3 règles
 - Intermétalliques
 - Solubilité variable
 - Composition ajustée



Propriétés des alliages d'aluminium

	Re	Rr	Ar
	Mpa	Mpa	%
• Aluminium pur (99,99%)	10	50	60
• Aluminium impur (99%)	35	90	35
• Duralumins	250	400	15
• Ferrite impure	200	300	40
• Perlite moyenne	450	850	15
• Limite aciers alliés	2400	2500	6

-
-
-

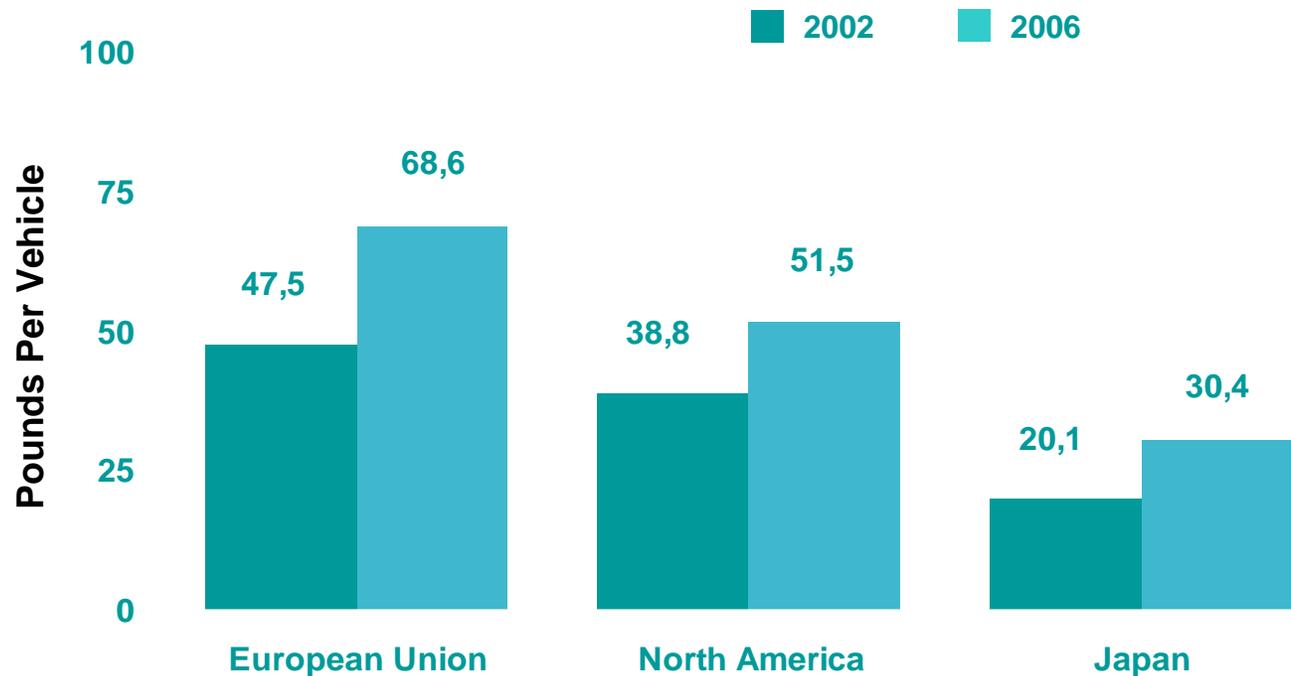
Application des alliages d'aluminium

Application en transport



Automotive industry

2002 Versus 2006 Content by Region for All Components other than Powertrain, Driveline, Wheels and Heat Exchangers



This comparison highlights why Europe is the worldwide leader in the use of aluminum for new innovative applications of aluminum in light vehicles.

Alliages d'aluminium - ALPAX

- Eutectique sans intermétallique Al-Si
- Naturellement dur, mais peu déformable
- Alliage de fonderie

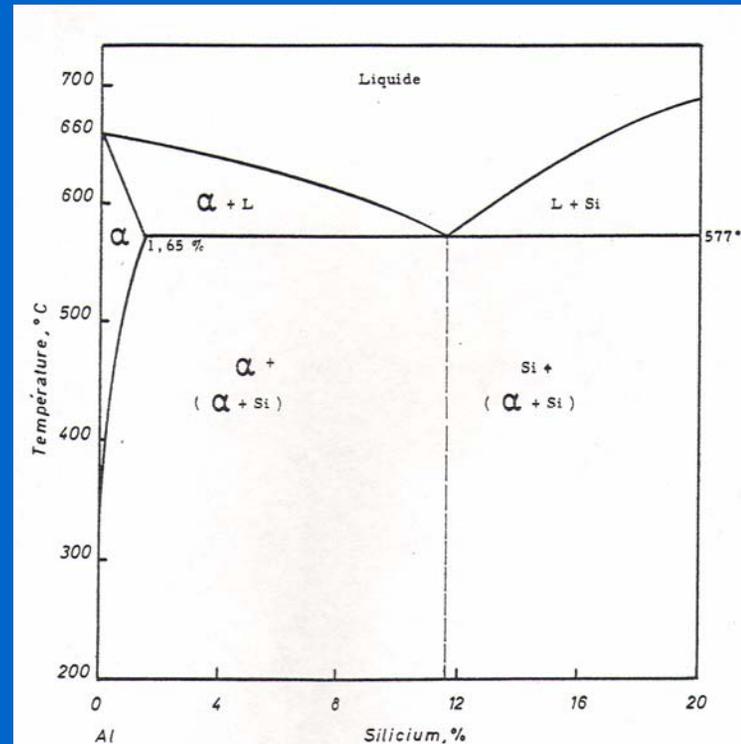
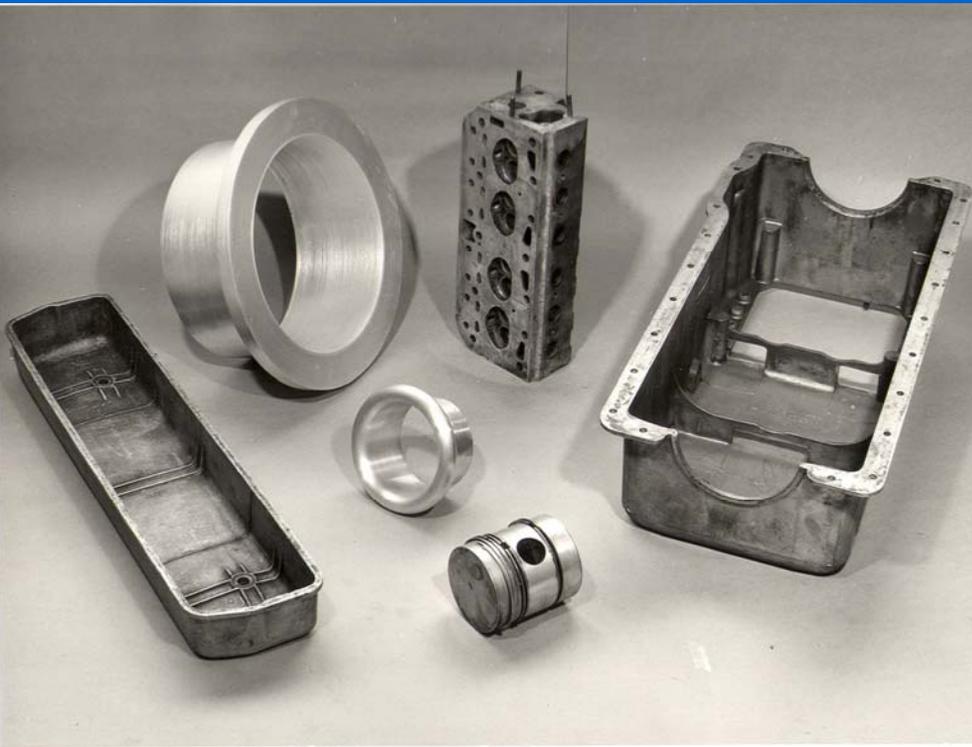


Figure IV.80 - Diagramme d'équilibre Al-Si.