

# Diagrammes de solidification des alliages « Fer – Carbone »

## 1 – Existence de 2 diagrammes

- Le carbone dépose, au cours de la solidification, soit sous forme de « **graphite** », soit sous forme de la combinaison « **Fe<sub>3</sub>C** » dite « **cémentite** » ; c'est notamment l'allure du refroidissement et l'influence des éléments étrangers (traces de Si, de Mn, etc.....) qui conduisent à l'un ou à l'autre cas.

- Il y a par conséquent deux diagrammes à considérer :

- 1°) Diagramme à graphite → état stable,
- 2°) Diagramme à cémentite → état métastable,

→ le second est le plus courant,

→ c'est ce diagramme que nous analyserons dans cette étude.

## 2 – Diagramme : Fe - Fe<sub>3</sub>C

**Nota** : on utilise souvent un diagramme simplifié [voir Docs. 01, 02] faisant abstraction du « **fer δ** » (delta) ; cette portion du diagramme sera vue à part ; elle ne présente que peu d'intérêt pratique.

Teneur en carbone de la cémentite « Fe<sub>3</sub>C »

$$\frac{12,01}{(55,84 \times 3) + 12,01} \times 10 = 6,67 \%$$

Masses atomiques :

Fe = 55.84

C = 12,01

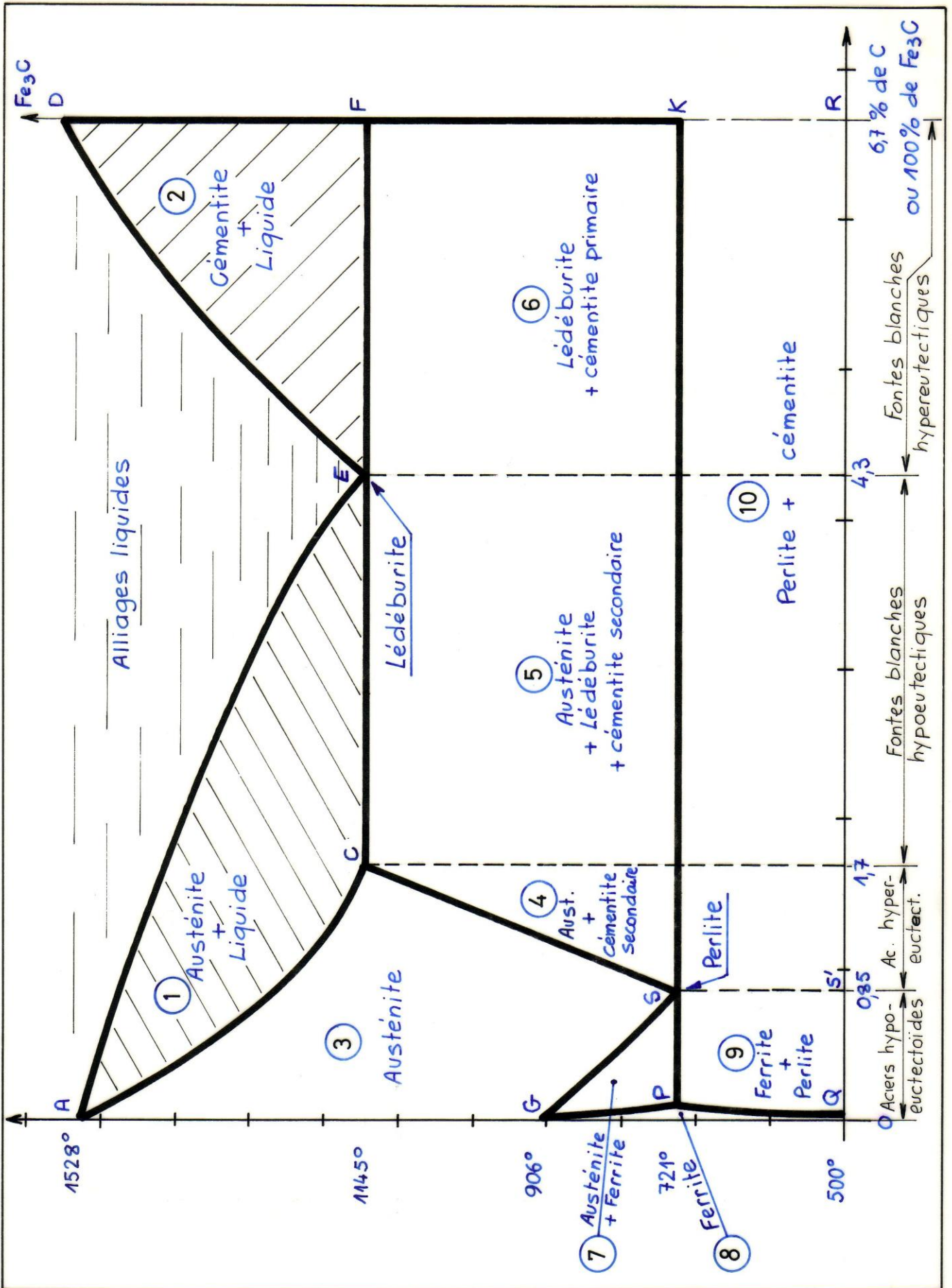


Diagramme d'équilibre  
Fer- Cémentite

# Etude des différents Domaines et Zones

\* Domaine ACE (2 phases) ①

Pour tout alliage dont % de C  $< 4,3$ , il y a dépôt de la solution solide de Carbone dans le Fer  $\delta$  (Austénite) suivant la branche AC.  
La teneur de l'Austénite varie de:  
0% à 1,7 % de Carbone

\* Domaine DEF (2 phases) ②

Pour tout alliage dont  $4,3 < \%$  de C  $< 6,7$ , il y a dépôt de Cémentite  $Fe_3C$  suivant le segment vertical DF.  
Cette Cémentite est dite primaire  
On remarque que la Cémentite à une composition constante au cours de la solidification, indépendante de la température: caractéristique d'une "Combinaison chimiquement définie".

Tout point situé au dessous de la ligne ACEF représente un alliage entièrement solidifié, formé de "UNE" ou "DEUX" phases et présentant un ou plusieurs constituants.

\* Domaine AGSC (1 phase) ③

Constituant l'Austénite de composition variable (titre de 0 % à 1,7 % de Carbone)  
L'Austénite ne présente pas de transformation au cours du refroidissement.

\* Domaine CEFKS (2 phases)

Domaine à 2 phases  
(CS) : Austénite de teneur en Carbone de 1,7 à 0,85  
(FK) : Cémentite de teneur constante, 6,67 % de C.

Zone ④  
Zone ⑤  
Zone ⑥

2 Constituants: Austénite + Cémentite secondaire  
3 Constituants: Austénite + Lédéburite + Cémentite secondaire  
2 Constituants: Lédéburite + Cémentite primaire

\* Domaine GPS (2 phases) ⑦

Constituants: Austénite + Ferrite  
Austénite s'enrichit suivant la branche GS de 0 % à 0,85 % de Carbone.  
Ferrite s'isole suivant la branche GP de 0 % à 0,02 % de Carbone à 721 °C.

\* Domaine GPQ (1 phase) ⑧

Constituant: Ferrite  
Solubilité maxi: 0,02 % de C à 721 °C.

\* Domaine PSKRQ (2 phases)

Domaine à 2 phases  
Constituants: Ferrite + Cémentite

Zone ⑨  
Zone ⑩

2 constituants: Ferrite + Perlite  
2 constituants: Perlite + Cémentite

Diagramme d'équilibre  
Fer - Cémentite

Doc 02

## 3\_ Points de transformations des aciers.

### 3-1 Définitions

- Il existe pour les aciers (teneur en C < 1,7%) des températures auxquelles correspondent des transformations internes.
- L'étude métallographique montre que ces transformations internes intéressent :
  - le mode de cristallisation
  - la nature des constituants
  - donc les caractéristiques mécaniques
- Ces transformations ne sont évidemment pas instantanées et ne se produisent pas à une température constante.
  - ⇒ il existe donc une température de début et une température de fin de transformation.

### 3-2 Mode de détermination des différents points

- La dilatation met en évidence les points  $A_0$   $A_1$   $A_3$
- Le magnétisme décèle le point  $A_2$
- L'analyse thermique met en évidence les points  $A_1$   $A_2$   $A_3$
- La résistivité permet de repérer les points  $A_1$   $A_3$ 
  - ⇒ On obtient le diagramme des points de transformation encore appelé "diagramme de ROOZEBOOM" (Voir Doc 02)

Remarque : Ces points théoriques correspondent à un chauffage et à un refroidissement très lents. Dans la pratique industrielle, les transformations de l'acier nécessitant une diffusion à l'état solide, sont très lentes et débutent alors que la température d'équilibre  $A$  est dépassée.

#### 3.2.1 Aciers hypoeutectoïdes

Le diagramme d'équilibre montre que pour un acier à faible teneur en carbone (ex: 0,25%) il existe quatre points de transformations :  $A_{c0}$   $A_{c1}$   $A_{c2}$   $A_{c3}$  à l'échauffement et  $A_{r0}$   $A_{r1}$   $A_{r2}$   $A_{r3}$  au refroidissement. (avec  $A_r < A_c$ ).

- Les points  $A_1$  et  $A_3$  correspondent à des changements de phases:
  - $A_1$  → réaction réversible  
Perlite (Ferrite + Cémentation)  $\rightleftharpoons$  Austénite à 0,85%

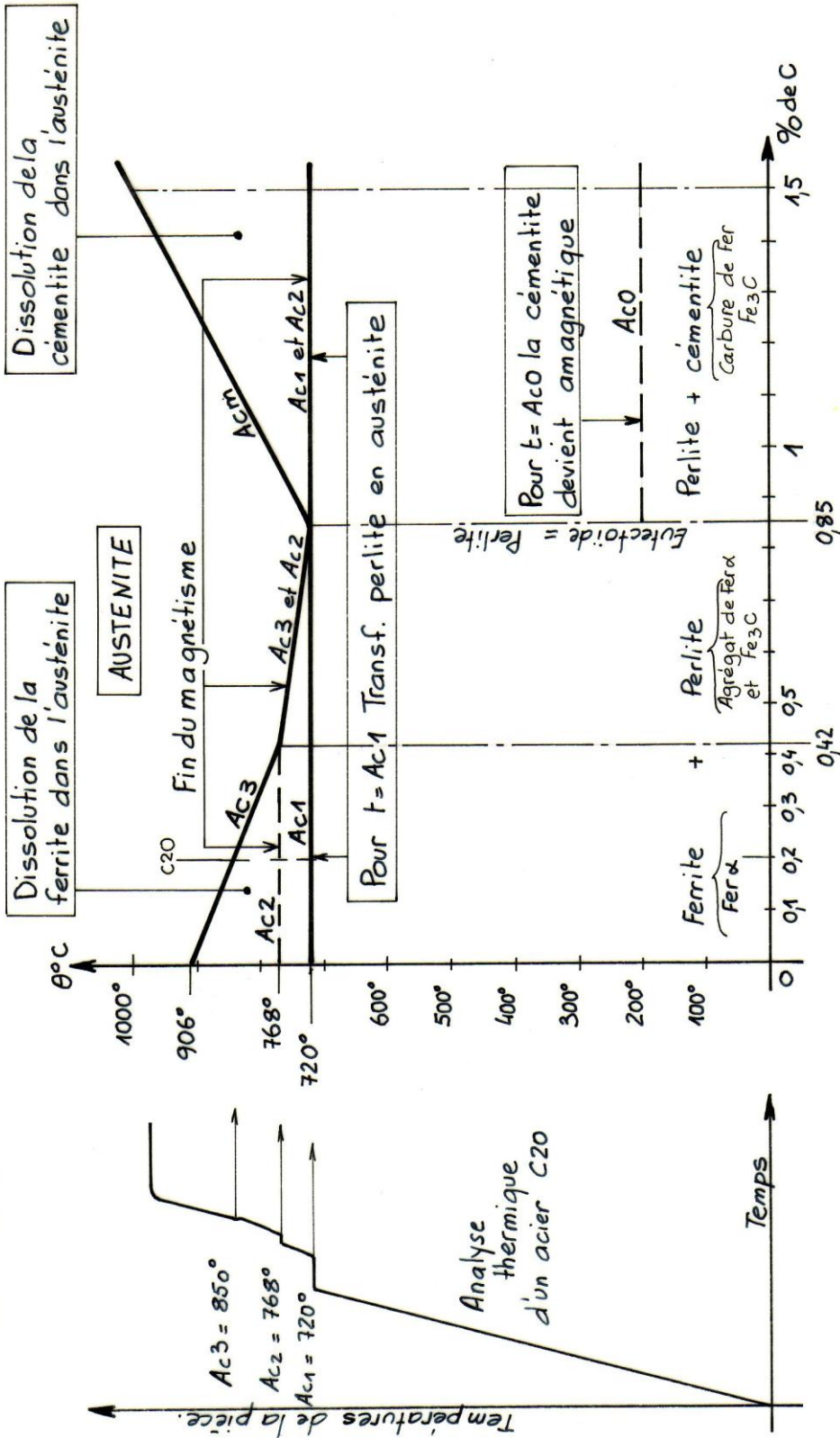
$A_3 \rightarrow$  dissolution de la ferrite dans l'austénite.  
la transformation se fait progressivement  
de  $A_1$  à  $A_3$

### 3.2.2 Aciers hypereutectoïdes

Le point  $A_1$  existe encore et est la même place ( $\theta = 720^\circ\text{C}$ )  
mais le point  $A_3$  est remplacé par le point  $A_{cm}$   
( $^{\circ}\text{cm}$  de cémentite)

$A_{cm} \rightarrow$  dissolution de la cémentite dans  
l'austénite (Transf. de  $A_1$  à  $A_{cm}$ )

DIAGRAMME DES POINTS DE TRANSFORMATIONS  
(diagramme de ROOZEBOOM)



NOTA: — Les points sont symbolisés par la lettre "A" affectée:  
1°) d'une lettre C → chauffage  
r → refroidissement

2°) d'un indice numérique, 0, 1, 2, 3 qui précise la transformation étudiée

— Les points  $A_0$  et  $A_2$  sont relatifs à des transformations réversibles sans changement de phase : ils ne devraient pas figurer sur le diagramme. Néanmoins ces 2 transformations sont souvent représentées par un trait discontinu.

## 4\_ Constituants des aciers recuits.

### 4-1 Classification.

— Les aciers ordinaires sont des produits sidérurgiques dont la teneur en carbone  $< \bar{a}$  1,7%.

- Aciers recuits chauffés à des températures inférieures au point de transformations  $A_{c1} = 720^{\circ}\text{C}$

ACIERS	% de C	PHASES	CONSTITUANTS
Hypoeutectoïdes	0 à 0,85%	Ferrite	Ferrite + perlite
Eutectoïde	0,85%	+	Perlite
Hypereutectoïdes	0,85 à 1,7%	Cémentite	Perlite + cémentite

- Aciers recuits chauffés à des températures supérieures aux points  $A_{c3}$  ;  $A_{c.cm}$ .

→ Le constituant unique est l'austénite  
NB: On peut obtenir de l'austénite à froid par un refroidissement extra-rapide faisant suite à un chauffage  $> \bar{a}$   $A_{c3}$

### REMARQUE: Constituants et phases

Ces deux termes qui permettent de caractériser la composition des alliages ne sont pas synonymes

→ le mot "CONSTITUANT" désigne les éléments constitutifs révélés par l'examen micrographique

→ le mot "PHASE" désigne une substance homogène quelle que soit sa structure.

### 4-2 Propriétés des constituants.

CONSTITUANT	DURETE	charge de rupture par traction	DUCTILITE	divers
Ferrite	HB = 80	$R = 30 \text{ daN/mm}^2$	$A = 35\%$	résilience $K = 30$ Masse volumique $7,86 \text{ Kg/dm}^3$
Cémentite	Très dure HB $\approx$ 700	$R \approx 0$	Très faible $A \approx 0\%$	résilience $K \approx 0$ Masse volumique $7,82 \text{ Kg/dm}^3$
Perlite	HB = 225	$R = 85$	$A = 10\%$	

## 4-3 Structure micrographique des aciers

### 4.3.1 Aciers hypoeutectoides

présentent des plages claires de FERRITE et des plages sombres de PERLITE, celles-ci sont d'autant plus importantes que la teneur en Carbone tend vers 0,85 %.

### 4.3.2 Acier eutectoïde

constitué uniquement de PERLITE présente la structure lamellaire (à l'état recuit)

NB: la perlite peut se présenter sous une structure globulaire (dans le cas d'une surchauffe à 1000°C)

### 4.3.3 Aciers hypereutectoides

présentent des plages sombres de perlite sur lesquelles la CEMENTITE se détache en clair.

→ Pour une même teneur en carbone l'agencement des constituants varie suivant le mode de refroidissement.

\* Structure cellulaire : refroidissement lent

\* Structure en aiguille (encore appelée de WIDMANSTÄTTEN)  
↳ refroidissement rapides

NB: Ces deux structures sont des structures limites, dans la pratique on a souvent une structure mixte

NB: D'autres facteurs tels que : la grosseur du grain, la teneur en certains éléments, agissent pour faire prédominer l'une ou l'autre de ces structures.

NB: Refroidissement lent → 100°/heure  
Refroidissement lent → 100°/minute

Refroidissement rapide → 50° à 200°/seconde  
Refroidissement très rapide → 500° à 1000°/seconde

### 4.3.4 Application à un acier hypoeutectoïde

(Ex : Acier à 0,6% de C)

