

# Traitements Superficiels de l'acier (Traitements Thermochimiques de diffusion).

## 1) Introduction

les traitements thermochimiques ont pour but la saturation superficielle de la pièce (acier) par un élément chimique (ex: carbone, azote, chrome, etc.) afin d'obtenir une dureté élevée en surface jointe à une bonne ductilité à cœur. La structure est alors macroscopiquement hétérogène (constitue un véritable matériau composite: âme très ductile et surface très dure).

- la diffusion a lieu à l'état atomique à partir d'un milieu extérieur (solide, liquide, gazeux) capable de lui céder l'élément diffusant, dit cément, porté à une température convenable.

- Cette opération est obligatoirement suivie d'un traitement thermique affectant la zone modifiée.

## 2.) Cémentation de l'acier

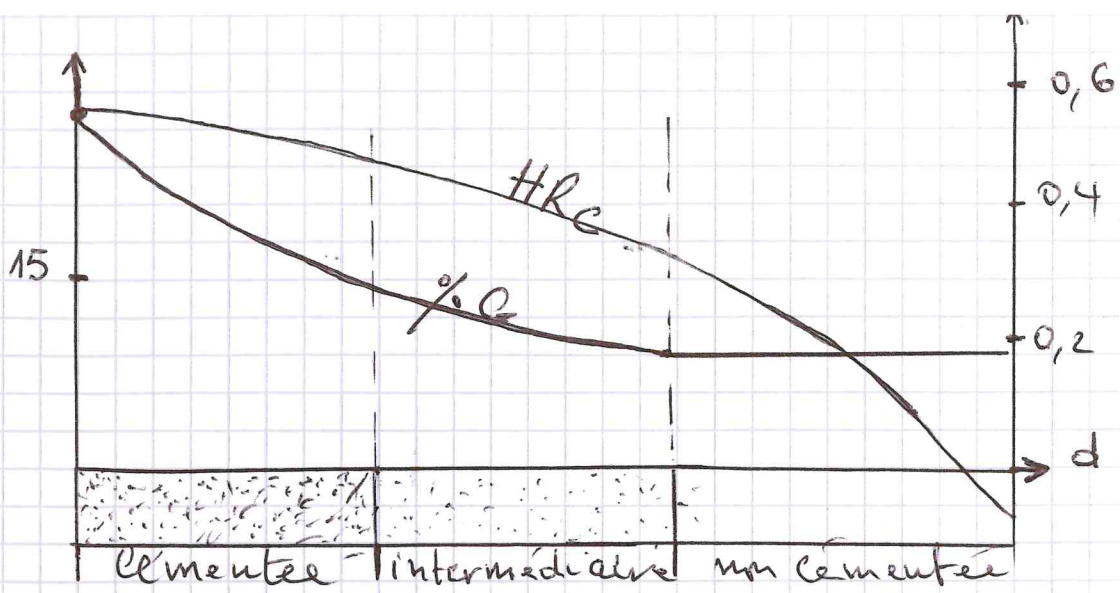
La cémentation est un traitement thermo-chimique de diffusion ayant pour but l'enrichissement en carbone d'une couche superficielle de la pièce à traiter en acier doux ( $0,1 \div 0,2 \% C$ ).

### 2.1) Mécanisme de la cémentation

La diffusion du carbone dans l'acier est obtenue seulement lorsque le carbone est à l'état atomique et en contact avec la surface du métal (acier). Le carbone atomique absorbé par la surface, diffuse vers l'intérieur des pièces.

La cémentation s'obtient suite à :

- Une réaction chimique dans le ciment qui donne le carbone actif.
- Une température d'austénitisation ( $\approx 950^{\circ}C$ ) et des temps de maintien de plusieurs heures).
- La concentration en carbone dans la pièce cémentée varie en diminuant de la surface jusqu'au cœur.



Profil de Cimentation dans une pièce.

### Remarque

l'emploi d'une température plus élevée risquerait de conduire à un grossissement du grain inacceptable.

### Ciments utilisés :

Généralement, on utilise 3 types de ciments,

#### a) Ciments solides :

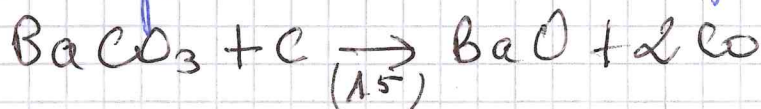
Généralement c'est le charbon de bois. Pour accélérer la cimentation, on ajoute au charbon des activateurs comme le carbonate de baryum ( $BaCO_3$ ).

Considérons par exemple le ciment de canon (60% charbon de bois + 40%  $BaCO_3$ ).

et du carbonate de sodium ( $Na_2CO_3$ ).

### Remarque

la présence de carbonates enrichit l'atmosphère de cimentation en gaz  $CO$ :



a- son tour, le gaz CO s'oxyde en présence du fer en donnant du carbone actif C qui diffuse dans l'acier:



Remarque:

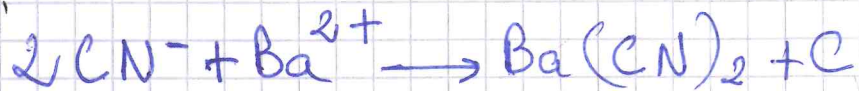
les ciments granules peuvent assurer a 900°C pour les aciers a faible teneur en carbone, une vitesse de pénétration de l'ordre de 0,2 mm / heure pendant les 10 premières heures.

## b) Ciments liquides:

les bains de cémentation sont formés de cyanure de sodium (NaCN), chlorure de barium (BaCl<sub>2</sub>) (activateur) et de chlorures alcalins (modérateurs) permettant de réaliser une fluidité convenable.

Du graphite en poudre surnage a la surface du bain et empêche l'action de l'air.

La réaction de cémentation peut se formuler par:



Deux types de bains:

1-) l'un contient 20% NaCN et peut être porté a (870 ÷ 900°C).

2-) l'autre contient 8% NaCN et peut être chauffé jusqu'a 950°C, ce qui permet une cémentation plus rapide.

## c) éléments gazeux

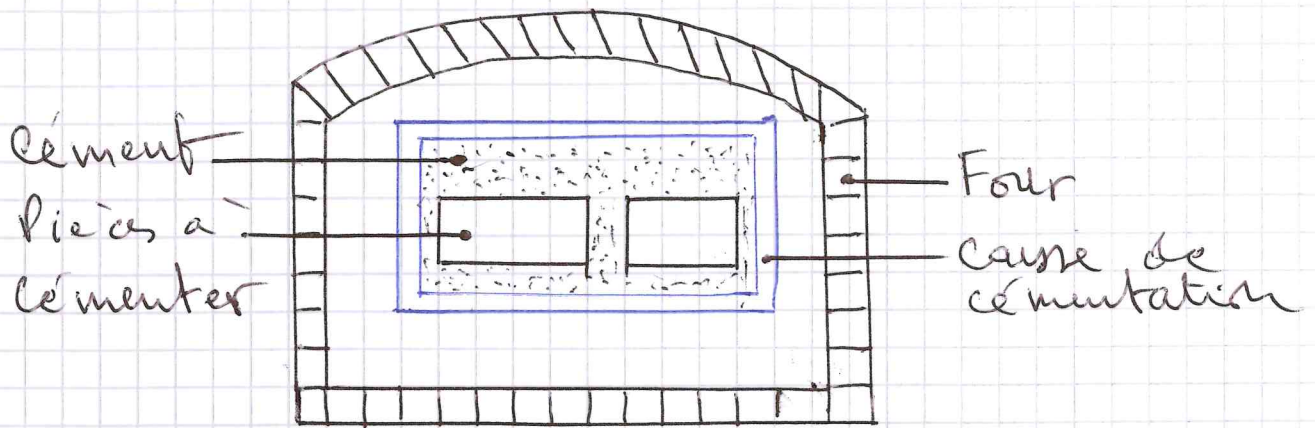
- les pièces sont chauffées dans un milieu riche en carbone,
- la meilleure couche cémentée s'obtient en utilisant comme gaz un mélange réducteur, composé de:  
 $CO + H_2 + N_2$  avec une faible proportion d'hydrocarbures:  
Ex:  $[20\% CO + 40\% H_2 + 38\% N_2 + 2\% C_3H_8]$
- Température de cémentation:  $900^\circ C$
- Vitesse de cémentation:  $\approx 0,4 \text{ mm/h}$ .

Résumé les différents ciments employés sont donnés dans le tableau ci-dessous:

Etat	Porteur de carbone	Activants
Solide	coke - charbon de bois	Carbonate de baryum
liquide	cyanure de sodium	Sels contenant chlorure
gazeux	gaz de ville (Naturel)	Propane

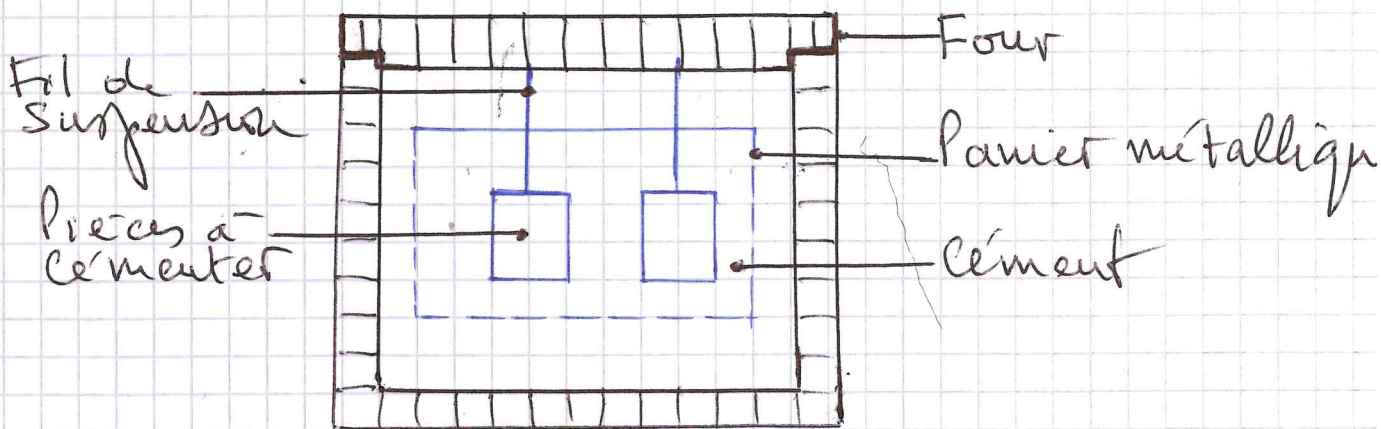
Remarque: En pratique, on utilise les types de cémentation suivants:

## 1.) En caisse (schéma):



Cémentation en caisse.

## 2.) En bain (schéma).

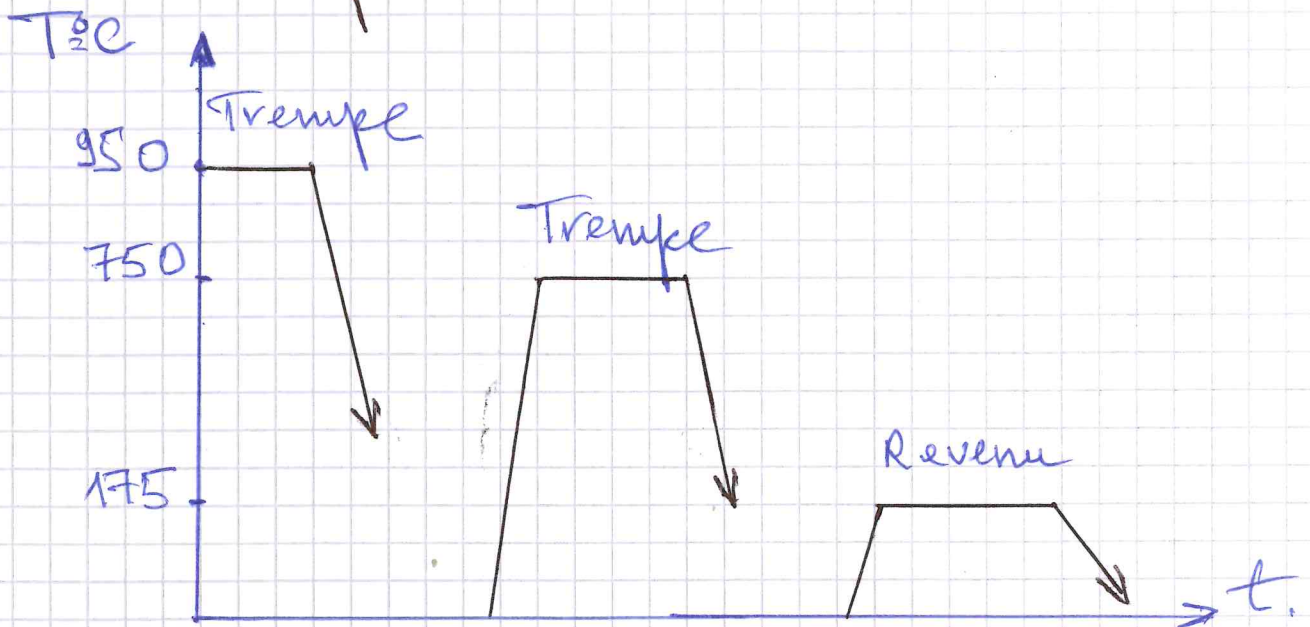


Cémentation en bain (cyanuration)

## Traitements après cémentation

- Durant la cémentation ( $\alpha$ : Cément solide).
  - a) Température très élevée: ( $> 900^\circ\text{C}$ )
  - b) Maintien très lent (plusieurs heures).Résultat: structure grossière (très fragile).  
Donc, il faut faire des traitements thermiques après cémentation.

- 1.) Trempe vers  $950^{\circ}\text{C}$  pour éliminer les gros grains (c.a.d. régénérer le métal).
- 2.) Deuxième trempe vers  $750^{\circ}\text{C}$ , pour durcir la couche cémentée.
- 3.) Un revenu vers  $175^{\circ}\text{C}$  pour éliminer les contraintes internes et la fragilité des pièces.



Programme de traitement thermique pour cémentation.

- Après cémentation en bain :

a) Dans ce cas l'opération est rapide ( $\leq 1\text{h}$ ) le métal n'est pas surchauffé, donc pas de traitements de régénération après cémentation.

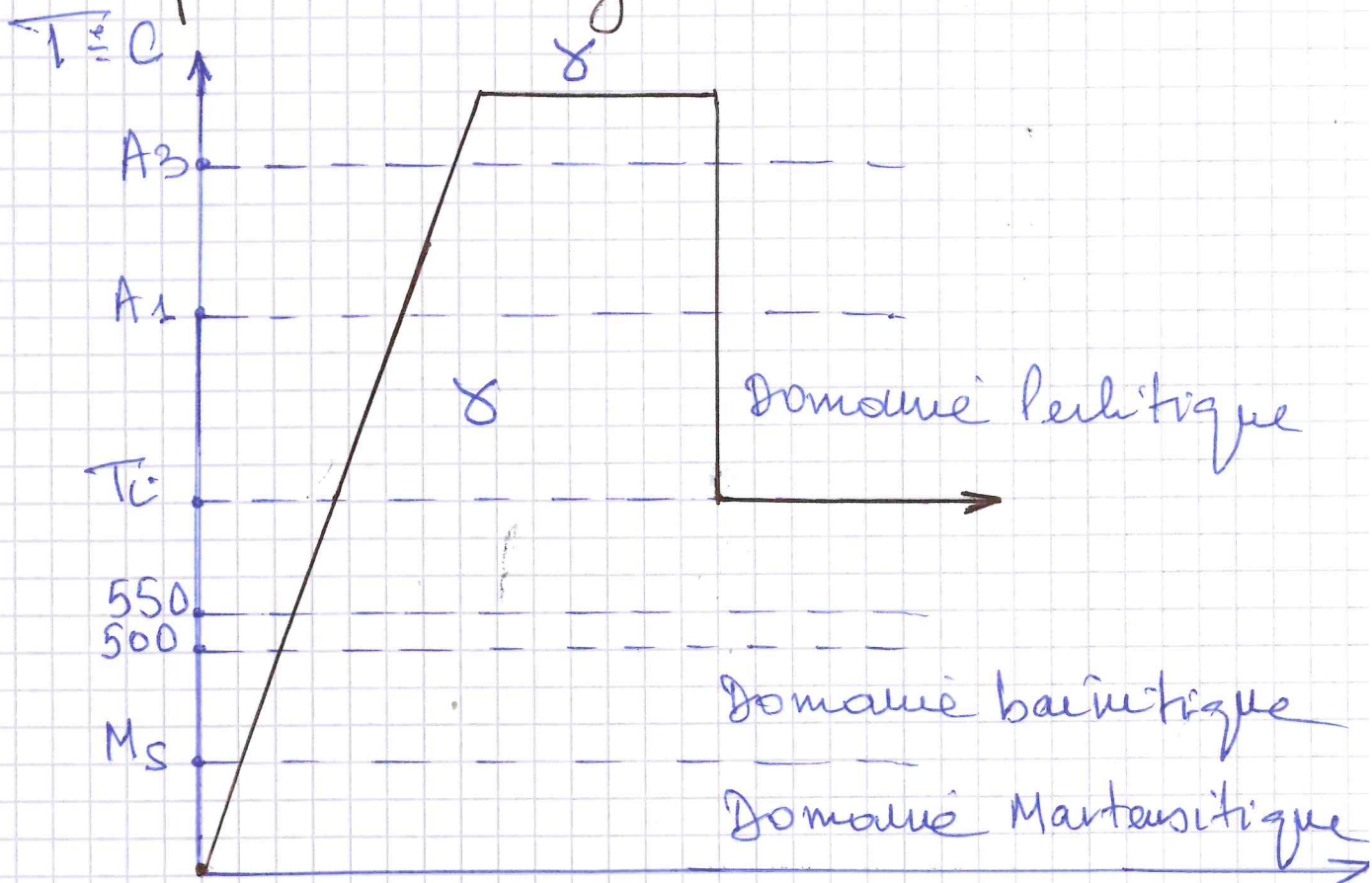
b) Trempe de durcissement à  $775^{\circ}\text{C}$

c) Un revenu à  $175^{\circ}\text{C}$ .

# Diagramme T.T.T

(a)

Les courbes T.T.T (Temps, Température, Transformation) les plus simples se présentent en général, comme ci-dessous :



Différents types de Transformations

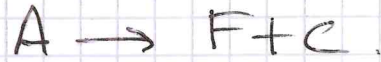
## Remarques:

- les courbes TTT sont limitées dans leur partie supérieure par la  $T_c$  de l'eutectoïde et leur partie inférieure par le point  $M_s$
- $T_c = T_c$  de maintien isotherme
- $M_s$  = martensite start



(b)

Donc  $M_s$  représente la température de début de transformation de la martensite.



- La transformation perlitique;  
 $(500 : 550 \text{ } ^\circ\text{C}) < T_c < A_1.$
- La transformation bainitique  
 $M_s < T_c < 500 \text{ } ^\circ\text{C}$
- La transformation martensitique  
 $T_c < M_s.$

### Remarque:

En dessous de  $M_s$  la diffusion du carbone devient très difficile et la transformation martensitique est une transformation sans diffusion. Elle est quasi-instantanée et à chaque  $T_c$   $T_c < M_s$ , une fraction déterminée d'austénite se transforme en martensite.

(21) et (22)

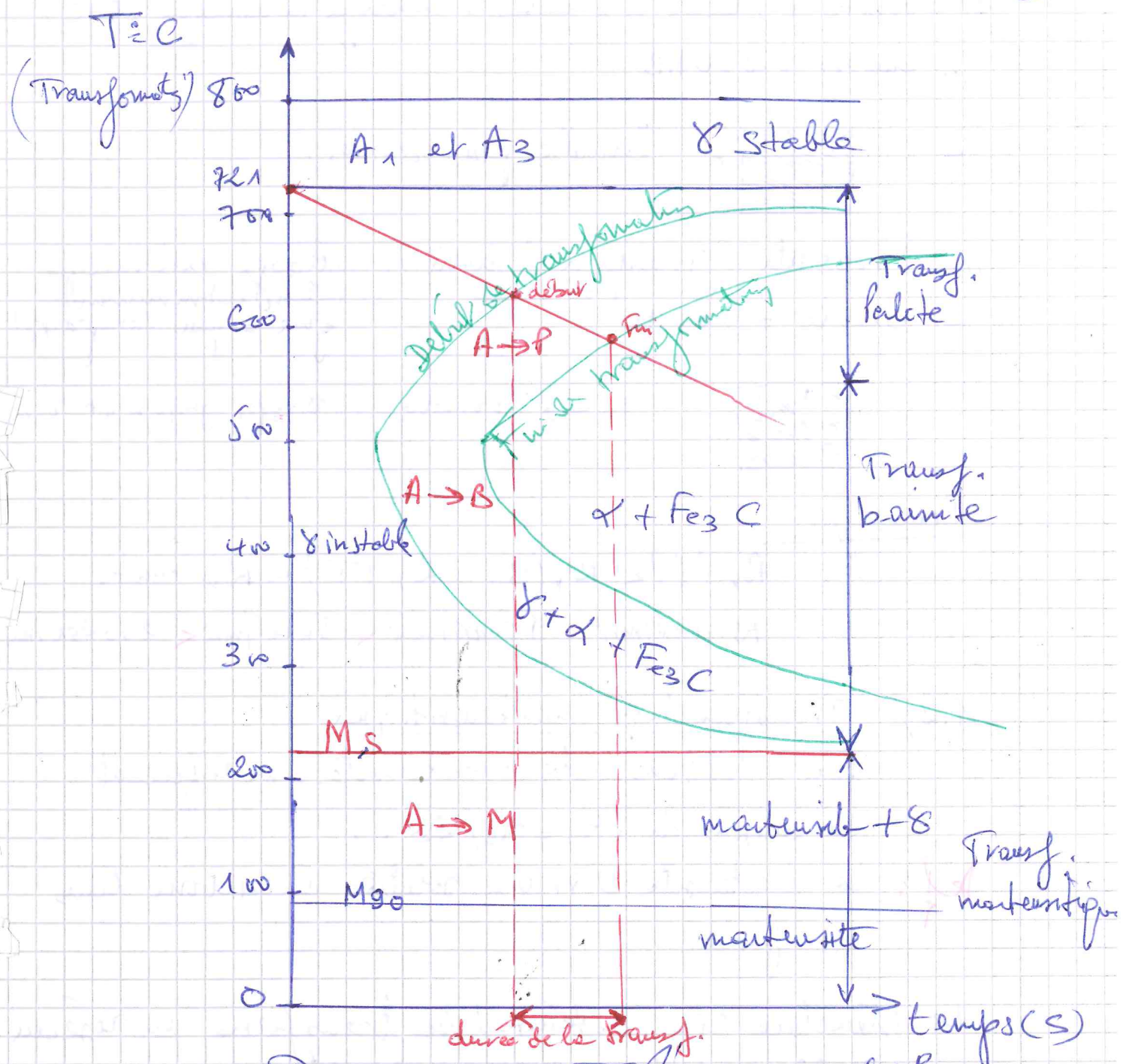
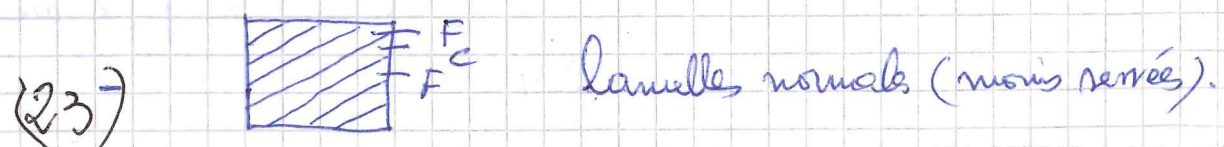


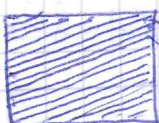
Diagramme TTT aciers ou castone

1) Transformations perlitique:  
 En dependance des dimensions des lamelles (Fe<sub>3</sub>C),  
 on classe la structure en 3 groupes.

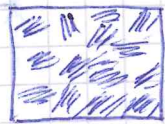
1.1. / Perlite  
 - durete ≈ 200 HB



2) Sorbite (Trempe à l'huile): mélange mécanique (F+C) <sup>(d)</sup>  
 - dureté  $\approx 280$  HB

-  lamelles plus serrées.

3) Troostite (Trempe à l'huile ou l'eau): mélange mécanique  
 - dureté  $\approx 400$  HB = (perlite extrêmement fine = plus compacte).



A  $\rightarrow$  Troostite (v. refr. jusqu'à  $500^\circ\text{C}$ )?

Remarque:

$R_v(P) < R_v(S) < R_v(T) < R_v \text{ mart.}$

$75 \text{ daN/mm}^2 < 90 \text{ daN/mm}^2 < 150 \text{ daN/mm}^2 < 250 \text{ daN/mm}^2$

1.2/ Transformation martensitique  
 Pour obtenir la martensite, on refroidit au dessous de  $(M_s = M_d) 200^\circ\text{C}$ .

**Def:** la martensite c'est une solution de carbone dans le fer  $\alpha$ .

La structure FCC (cristallite) se transforme en réseau cristallin tétraogonal (cube allongé  $\frac{b}{a} > 1$ ) juste après la trempe (ex: eau).

Après revenu la forme tétraogonale se transforme en forme cubique  $\frac{b}{a} = 1 \Rightarrow a = b$ .

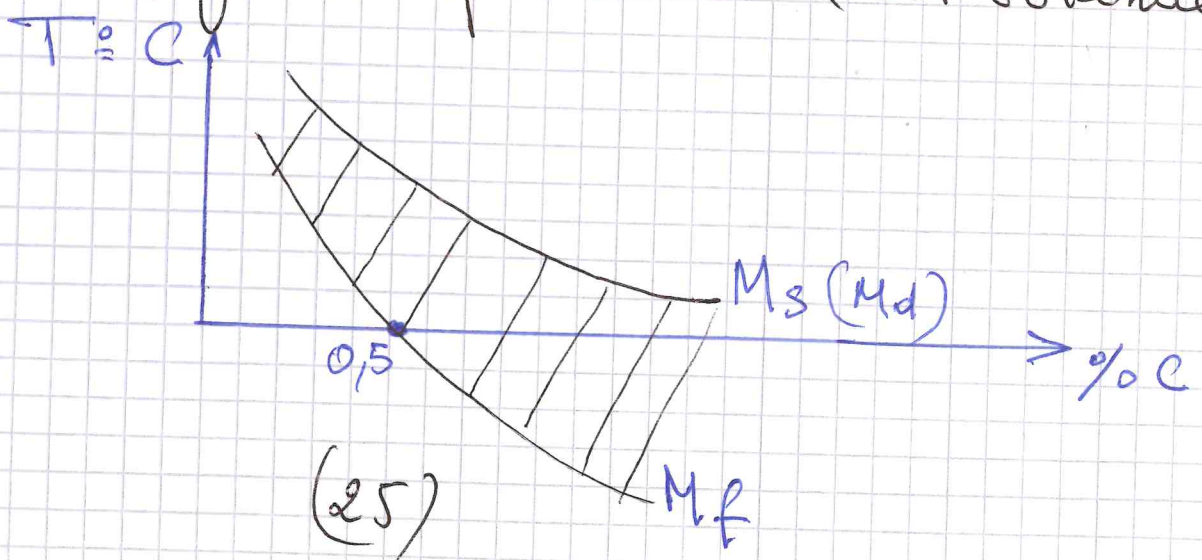
La transformation martensitique dépend aussi de la teneur en carbone (avec vitesse de refroid.  $\approx 500^\circ\text{C/s}$ )

$\rightarrow$  Trempe dans l'eau glacée ou l'air liquide.

- si la teneur en carbone  $< 0,25\%$  (e) impossible d'avoir la martensite, quelque soit le milieu de refroidissement. On obtient dans ce cas une transformation intermédiaire (Bainite inférieure)
- si le % de carbone  $> 0,5$ , il y a toujours de l'austénite résiduelle car ( $T_{Mf} < 0$ ), c.a.d la transformation continue d'avoir lieu (fig. ci-dessous).
- Austénite résiduelle = Mélange de perlite, Bainite, troostite, sorbite, etc.

### Remarques

- plus la teneur en carbone est grande plus la quantité de l'austénite résiduelle est grande aussi.
- Si on veut obtenir une phase quelconque ( $\alpha$ : Bainite, troostite, etc.), il faut faire des essais pratiques dans différents milieux de refroidissement jusqu'à ce que la phase voulue est obtenue.

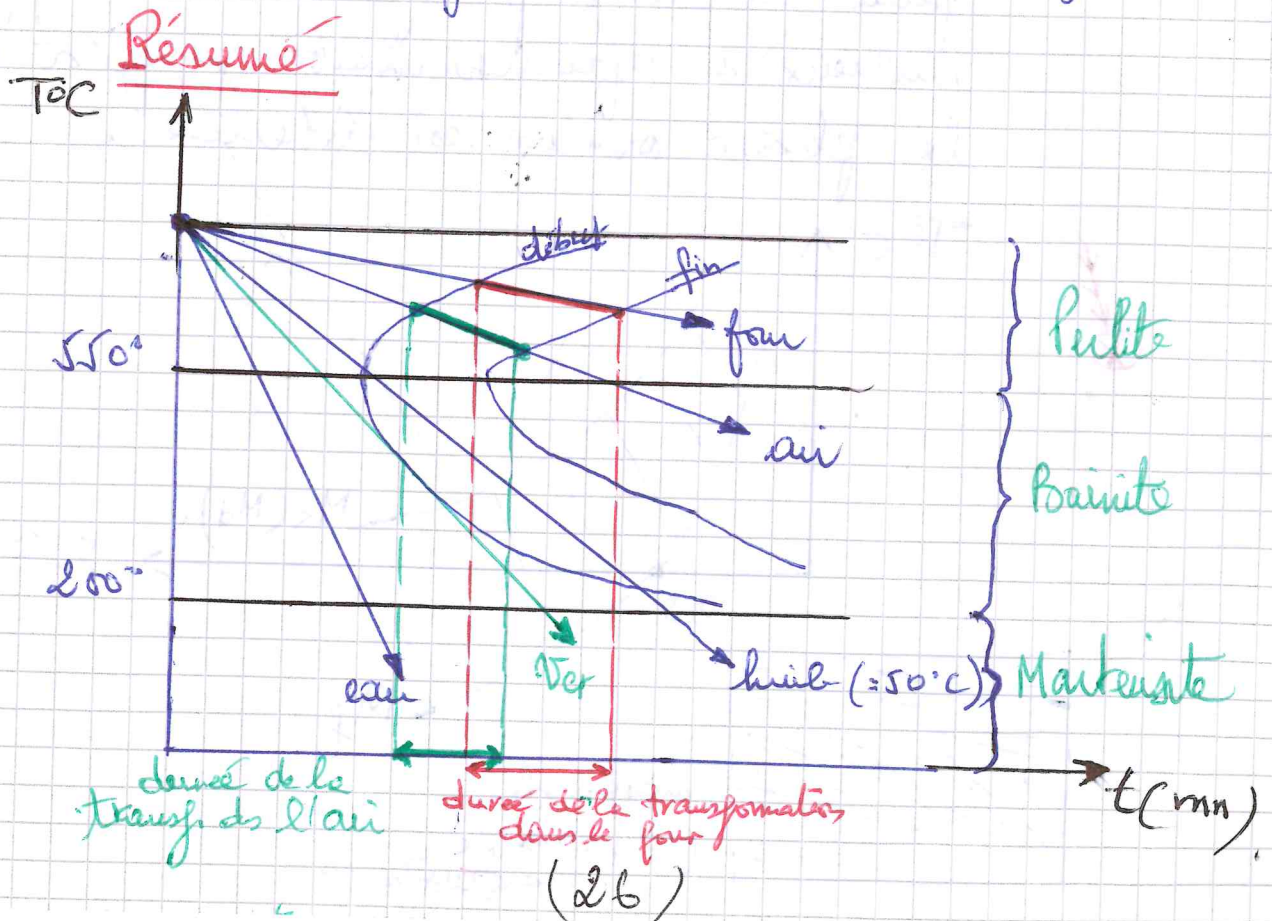


### 1.3. / Transformation bainitique (5)

Bainite = mélange mécanique (perlite + martensite) de la solution solide  $\alpha$  sursaturée en carbone dans le fer  $\alpha$  (% C  $\approx$  0,1% de la solution).  
La transformation bainitique est entre 550 et 200°C mais elle ne se déroule pas jusqu'à la fin, c.à.d. on ne peut pas avoir 100% de bainite. L'austénite qui ne se transforme pas en bainite se transforme en perlite ou en martensite.  
Plus la  $T^{\circ}$  de transformation est basse plus la vitesse de cette transformation est faible.

### Remarque

À la fin et à mesure que la  $T^{\circ} \downarrow$ , la transformation perlitique est remplacée par une nouvelle transformation dite bainitique.



Remarque 2

En réalité il y a 2 transformations  
ferrite et Martensite.

Le reste c'est un mélange de ferrite et Martensite

Remarque 3

Sur le plan pratique :


Le refroidissement dans l'air  $\Rightarrow$  ferrite  
eau  $\Rightarrow$  Martensite  
Huile  $\Rightarrow$  bainite

Travail réalisé au laboratoire

Effet des milieux de refroidissement sur le bainite de l'acier.  
Temps.

Nuance	T°C	milieu	dureté (HB)	structure
XC42	850	Four	192	F + L
		air	212	Sorbite + L
		huile	495	Troostite + mart.
		eau	745	Martensite
XC120	750	Four	196	P + C
		air	241	Sorbite + Cinn
		huile	524	Troost + martite
		eau	780	mart. + Cinn

# Influence de la température du revenu sur la structure des aciers alliés

1.) Revenu à basse température : ( $0 \div 200^\circ\text{C}$ )  $\Rightarrow$  martensite de trempe se transforme en martensite au revenu (réseau cristallin tétragonal se transforme en cube) :   $\Rightarrow$  grande dureté et grande résistance à l'usure.

2.) Revenu à température moyenne ( $200 \div 400^\circ\text{C}$ )  $\Rightarrow$  Troostite de revenu : (bonne plasticité, bonne  $R_r$  et bonne dureté).

3.) Revenu à haute température : ( $400 \div A_1$ )  $\Rightarrow$  Sorbite de revenu (grande plasticité).

## Travail réalisé au laboratoire

Effet de la T : du revenu sur la dureté des aciers alliés

Nuance	HB (avant Rev.)	T° Rev.	HB (après Rev.)
XC42	578	200	477
		400	302
		600	255
Z100C15	627	200	578
		400	534
		600	341

Remarque : Dureté des différents constituants des aciers et  $R_m$ .

perlite lamel. ( $200 \div 250$ ) HB et  $R_m = 75 \text{ daN/mm}^2$   
 austénite ( $230 \div 280$ ) HB  $R_m = 85 \text{ daN/mm}^2$   
 sorbite ( $250 \div 300$ ) HB  $R_m = 90 \text{ daN/mm}^2$   
 troostite ( $400 \div 450$ ) HB  $R_m = 150 \text{ daN/mm}^2$   
 martensite ( $650 \div 750$ ) HB  $R_m = 250 \text{ daN/mm}^2$

(28)