

# Traitements thermiques des alliages

1- Rappels et prérequis

2- Transformations au chauffage

**3- Transformations de l'austénite**

**3-1. Transformations en refroidissement continu**

**3-2. Transformations isothermes**

3-3. Notion de trempabilité

4- Transformations au revenu

5- Applications

### 3- Transformations de l'austénite

Pour étudier les développements de la **transformation de l'austénite dans des conditions hors équilibre**, on peut, imitant la **pratique industrielle**, procéder à des **refroidissements plus ou moins rapides ou plus ou moins lents** au cours desquels on détermine les changements structuraux qui se produisent jusqu'au retour à la température ambiante. On effectue ainsi une étude dite en « **refroidissement continu** » (TRC).

L'expérience montre que les résultats obtenus peuvent être complexes et difficiles à analyser.

Pour mieux décomposer les phénomènes et distinguer plus aisément les effets du temps d'une part et ceux de la température d'autre part, on peut procéder à une **analyse du déroulement des transformations au cours de maintiens isothermes** à des températures inférieures à la limite du domaine de stabilité de l'austénite. On réalise ainsi l'étude dite en « **conditions isothermes** » (TTT).

## **3-1. Transformations en refroidissement continu**

### **3-1.1. Méthodes d'étude**

### **3-1.2. Courbes DILATOMÉTRIQUES lors de refroidissement**

### **3-1.3. Vitesses de refroidissement normalisées**

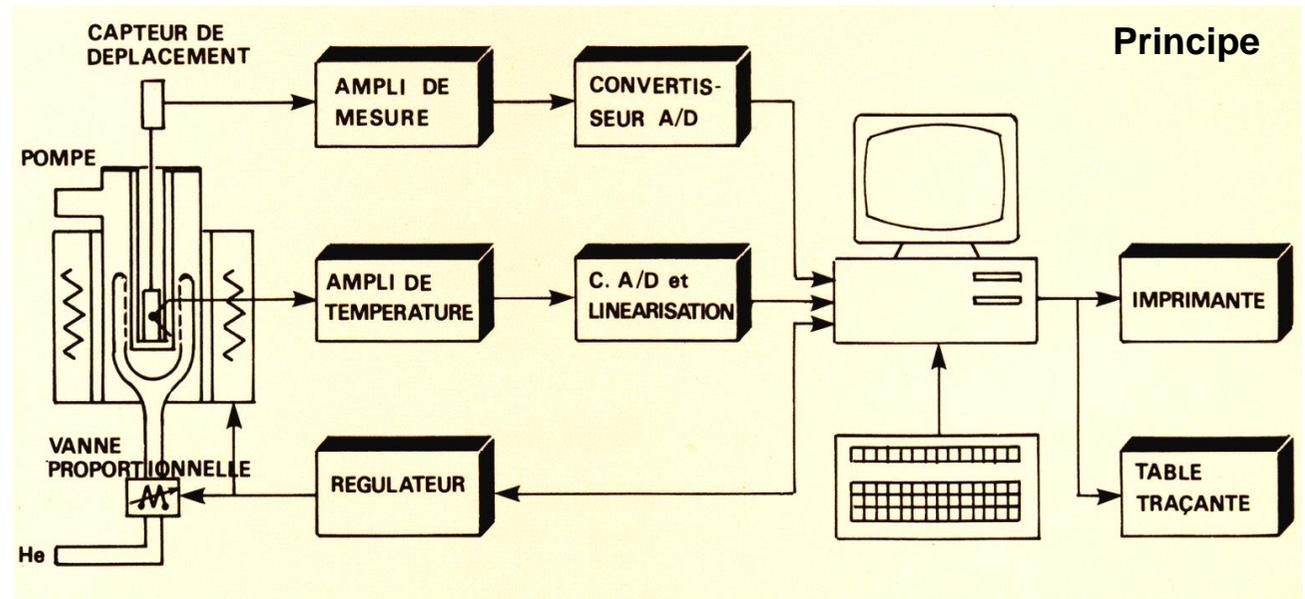
### **3-1.4. Facteur influençant les courbes TRC**

### 3-1.1. Méthodes d'étude

⇒ Dilatométrie



Suivi de la dilatation d'échantillons en fonction de la température  
Au chauffage, au refroidissement, lors des paliers isothermes, de cycles



⇒ Micrographie

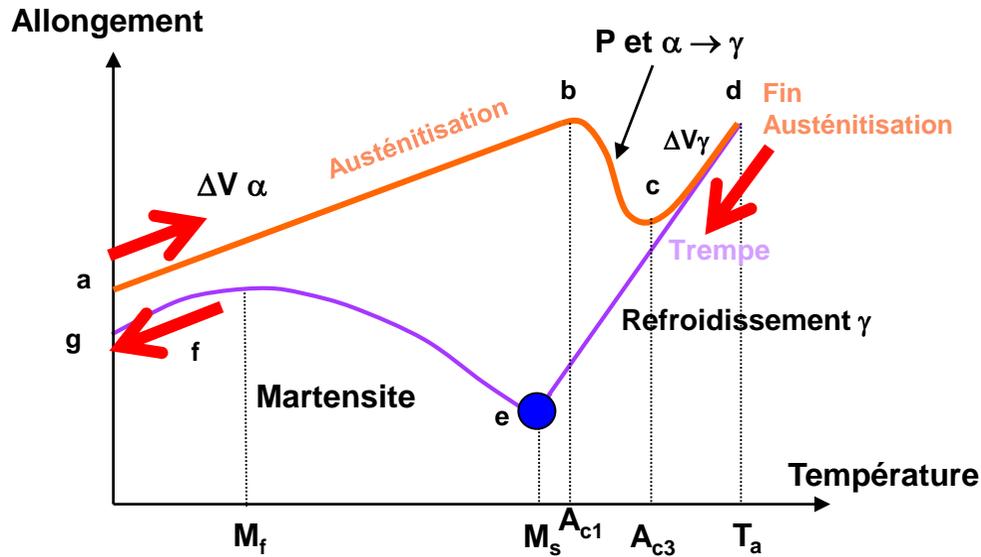
A chaque température et pour des temps échelonnés  
Trempe à l'eau et examen des microstructures

Sens de lecture

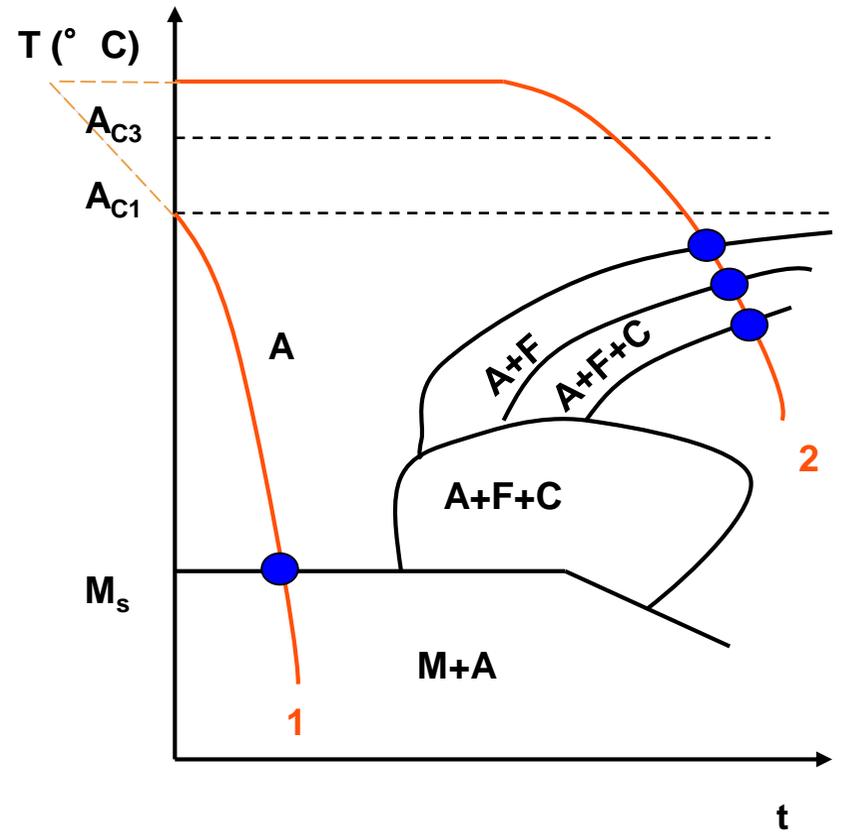


3-1.2. Courbes DILATOMÉTRIQUES lors de refroidissement

Courbe 1



Vitesse de trempe « élevée »  
Microstructure finale MARTENSITE

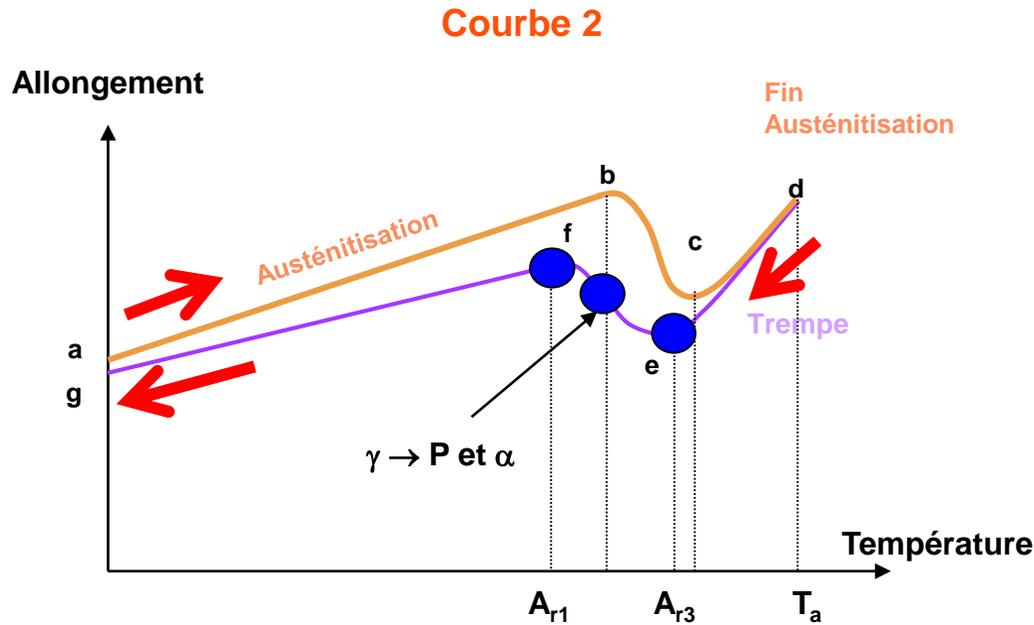


$\Delta V$  : variation de volume ;  $M_f$  : fin de la transformation en martensite ;  $M_s$  : début de la transformation en martensite ;  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ ,  $A_{r1}$ ,  $A_{r3}$  : points de transformation (voir diagramme équilibre Fe-C) ;  $T_a$  : température d'austénitisation

Sens de lecture

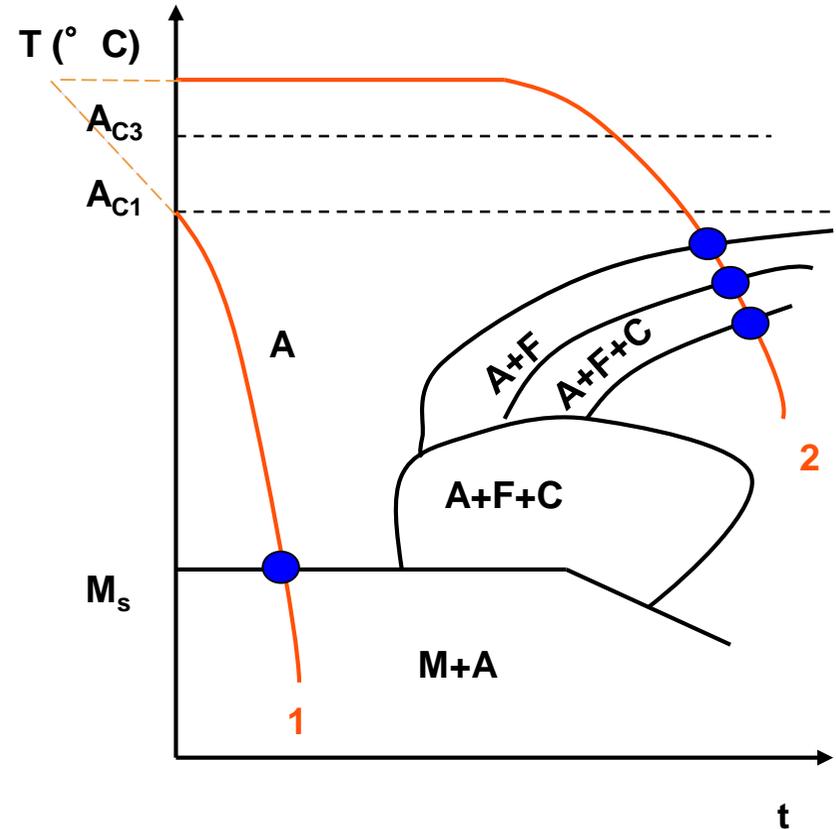


### 3-1.2. Courbes DILATOMÉTRIQUES lors de refroidissement



Vitesse de trempe « faible »

Microstructure finale FERRITE + PERLITE



$\Delta V$  : variation de volume ;  $M_f$  : fin de la transformation en martensite ;  $M_s$  : début de la transformation en martensite ;  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ ,  $A_{r1}$ ,  $A_{r3}$  : points de transformation (voir diagramme équilibre Fe-C) ;  $T_a$  : température d'austénitisation

### 3-1.3. Vitesse de refroidissement « normalisées »

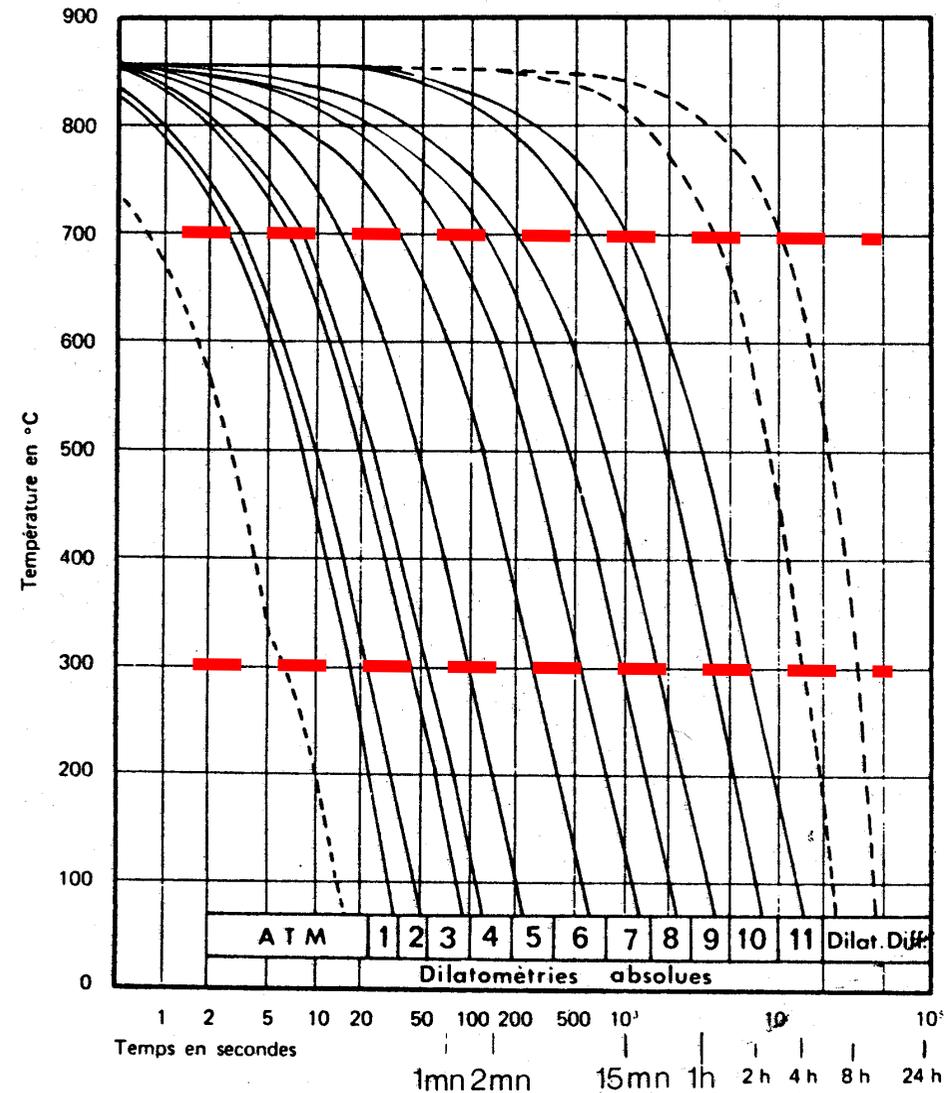
Vitesses de refroidissement couramment adoptées pour l'établissement des courbes TRC.

- |                      |             |                                       |
|----------------------|-------------|---------------------------------------|
| 1 Eau                | 5 Air libre | 9 Four ouvert + Moufle 2              |
| 2 Huile              | 6 Moufle 2  | 10 Four 1/2 ouvert                    |
| 3 Air soufflé 1 kg   | 7 Moufle 3  | 11 Four fermé + Moufle 5              |
| 4 Air soufflé 0,5 kg | 8 Moufle 5  | ATM : analyse thermique et magnétique |

On peut définir une vitesse de refroidissement moyenne : temps (en s) nécessaire pour passer de 700 à 300 ° C. Partie linéaire de la courbe de refroidissement.

$$\bar{V} = \frac{700 - 300}{(\Delta t)_{700}^{300}}$$

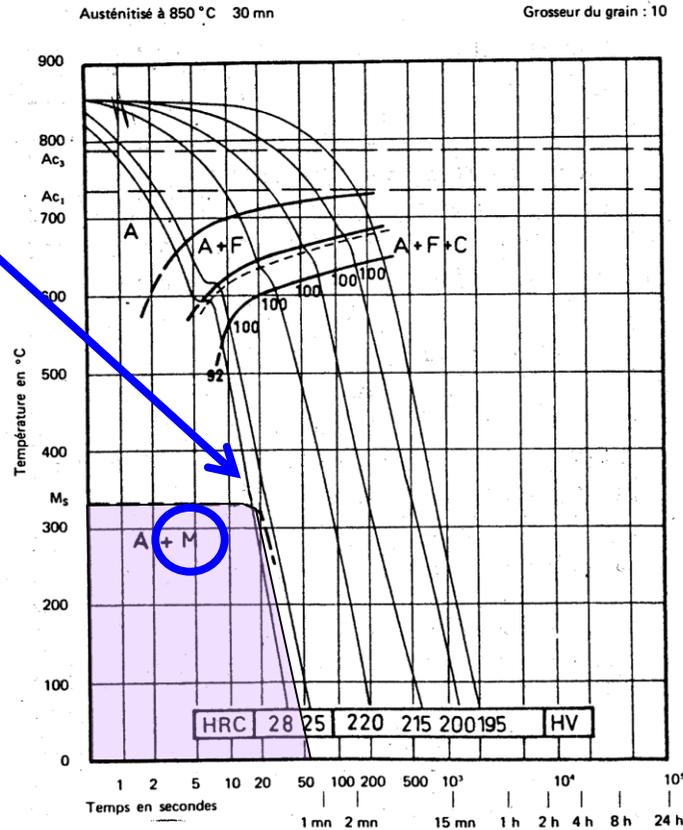
Vitesse de refroidissement moyenne



### 3-1.4. Facteur influençant les courbes TRC

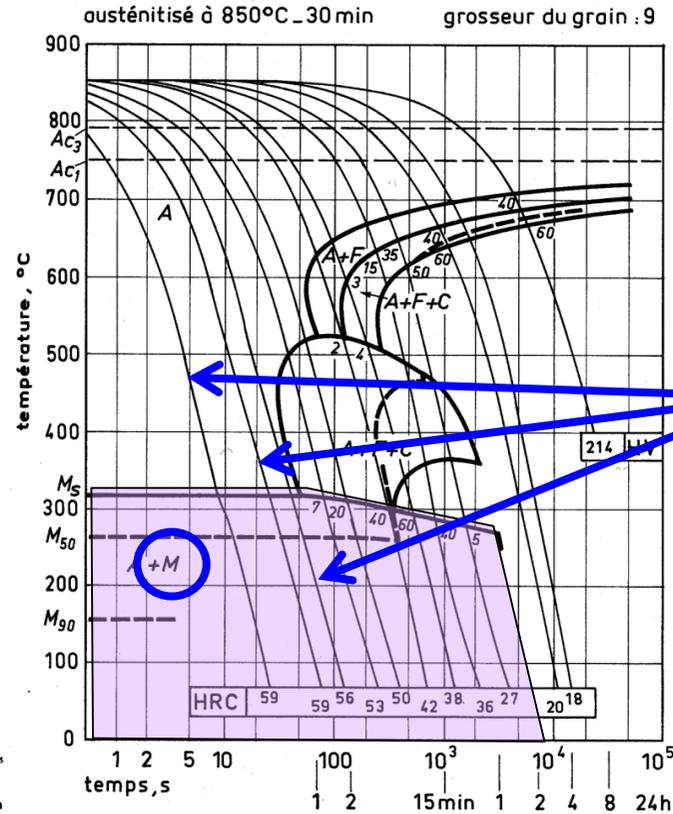
Principalement les éléments d'alliages : TOUS augmentent la trempabilité

Acier C42  
0.42%C, 0.72%Mn



Une seule loi de refroidissement permet de ne passer que par la Martensite

Acier 42 Cr 4  
0.44%C, 0.80%Mn, 0.96%Cr



Important!

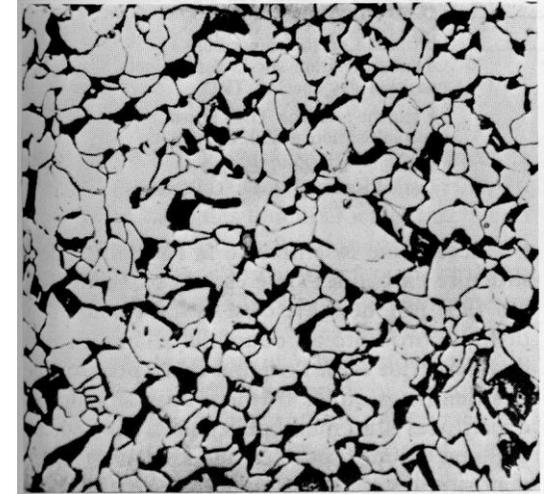
Trois lois de refroidissement permettent de ne passer que par la Martensite :  
**meilleure trempabilité**

### 3-1.4. Facteur influençant les courbes TRC

⇒ Austénitisation

austénitisé à: 15 min  $\left\{ \begin{array}{l} \overline{850^{\circ}\text{C}} \\ \overline{1250^{\circ}\text{C}} \end{array} \right.$  grain  $\gamma$  : 10  $\mu\text{m}$   
 grain  $\gamma$  : 200-250  $\mu\text{m}$

Structure ferrite-  
perlite fine

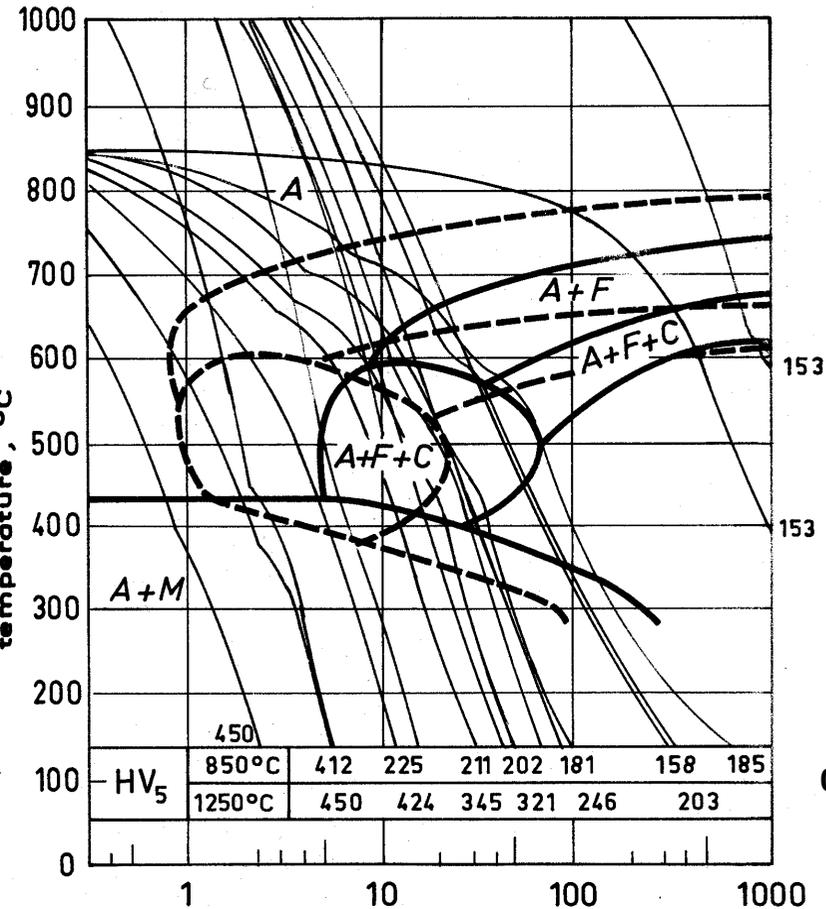


50  $\mu\text{m}$

Augmentation de  $T_A$  stabilise l'austénite ce qui pousse les domaines vers la droite

Favorise la formation de constituants de type aciculaire

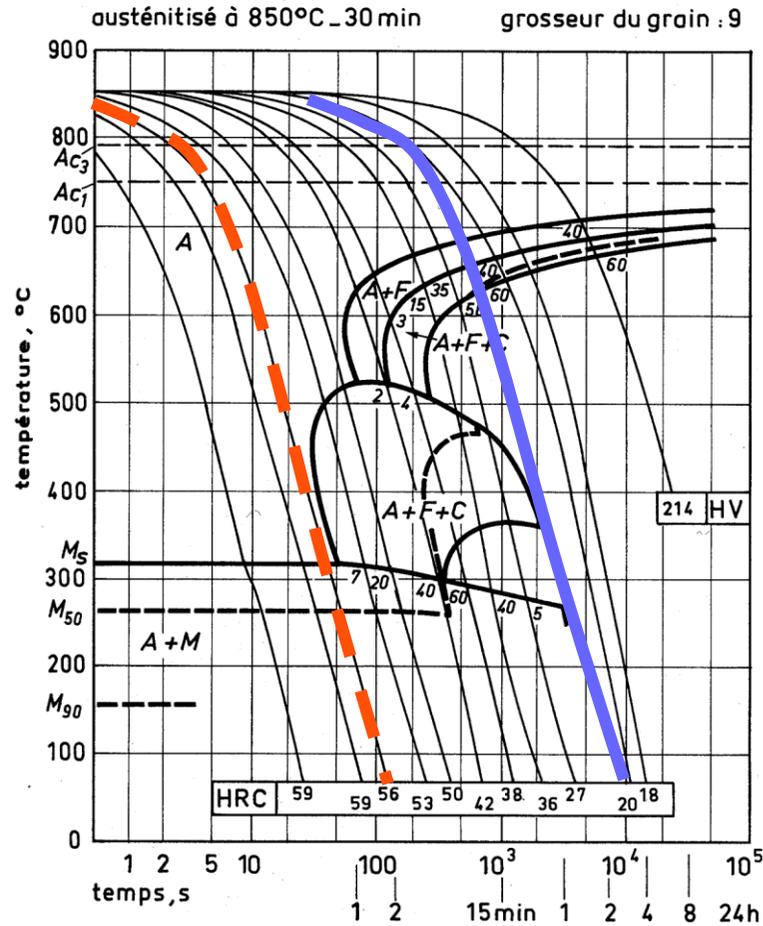
Structure ferrite  
aciculaire et  
d'agrégats  
carbures



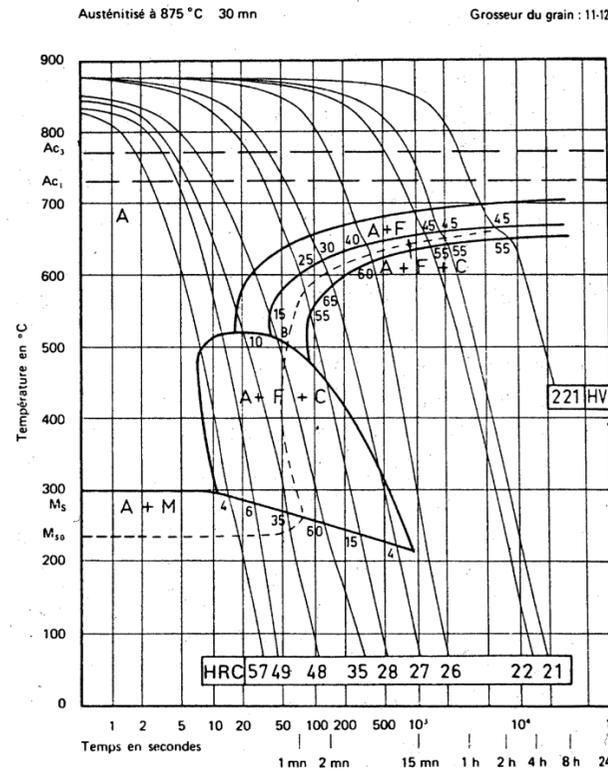
Acier 18 M 5  
0.18%C, 1.30%Mn

Utilité des courbes TRC

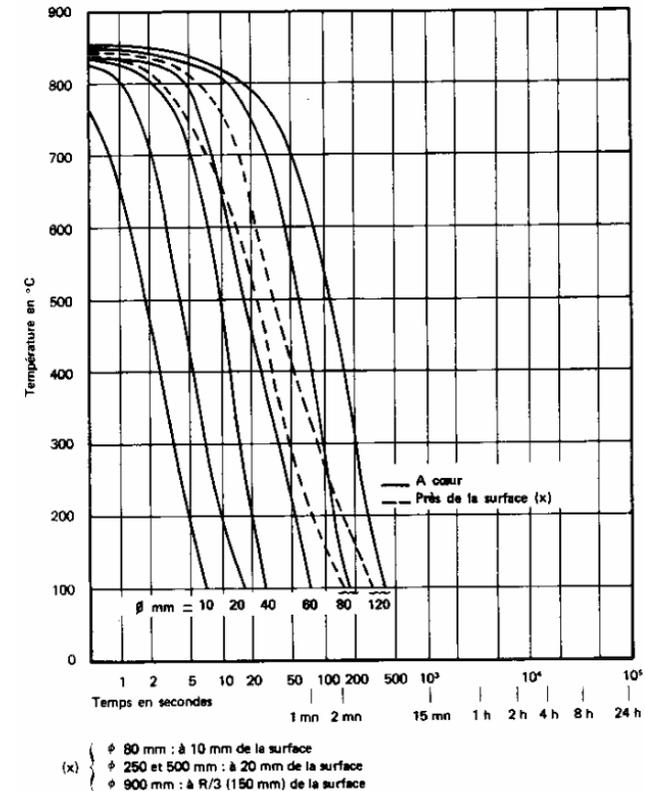
Calcul des vitesses critiques



Prévoir la microstructure (donc la dureté) dans une barre (dimension) en fonction du mode de refroidissement



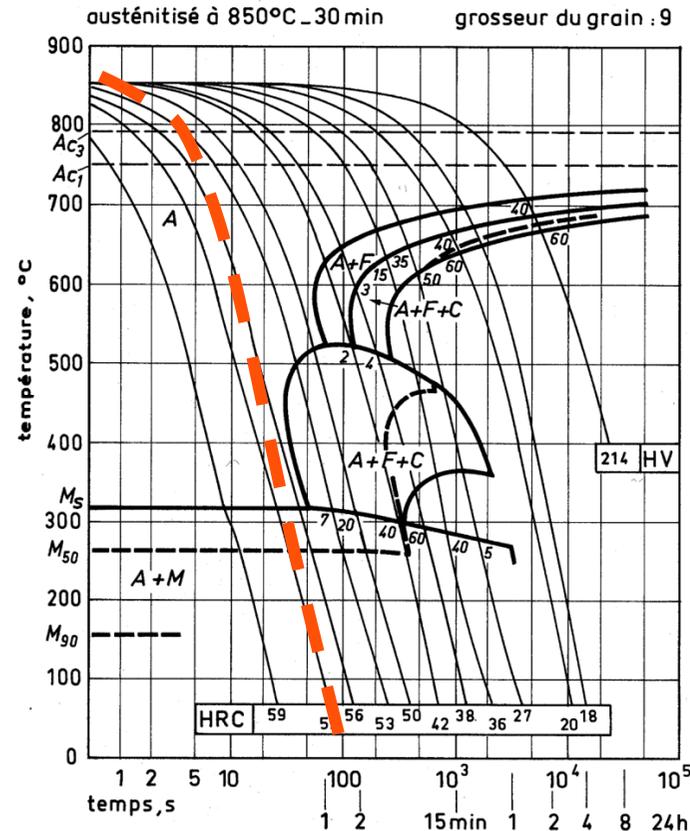
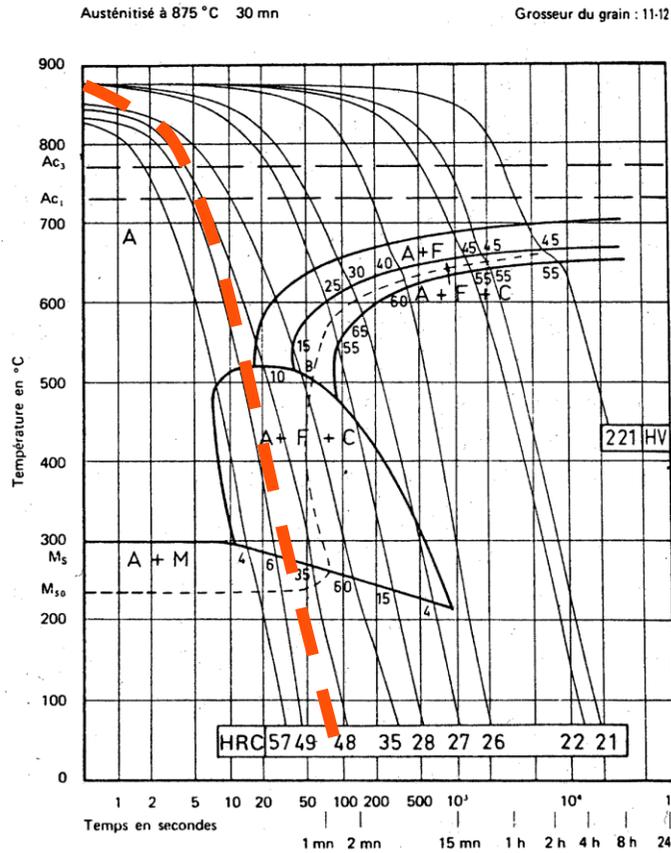
Mode de refroidissement : EAU



⇒ Utilité pour le concepteur

Si les contraintes mécaniques l'imposent, le traitement doit être total dans la masse

Pour un même diamètre et un même refroidissement : **utiliser des aciers plus alliés**

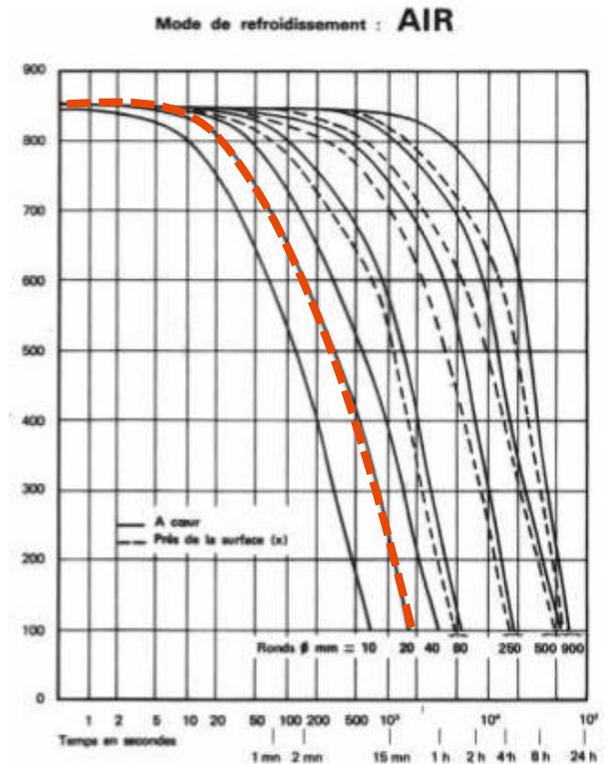
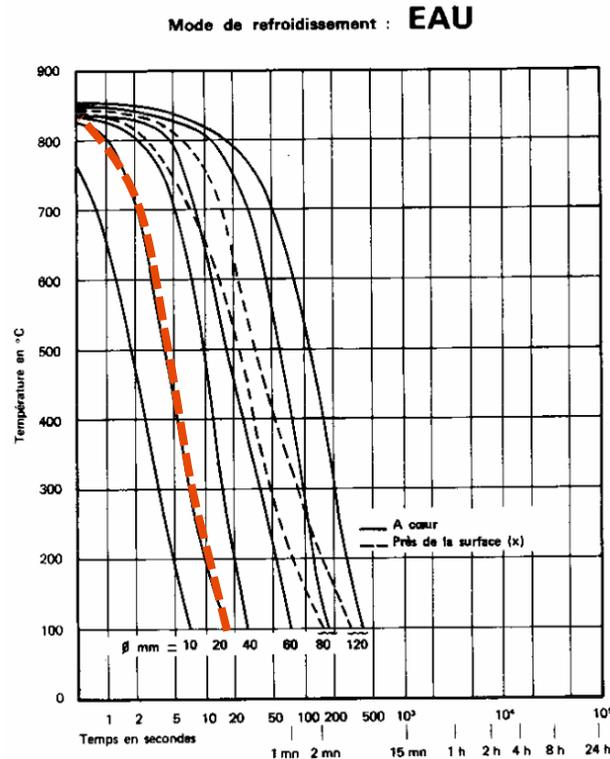
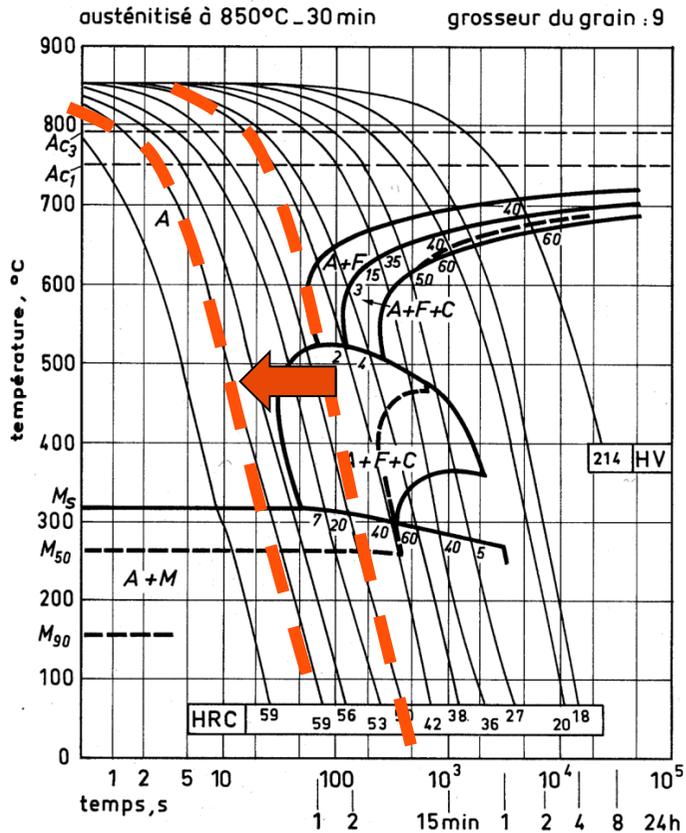


**Solution onéreuse**  
 Acier non allié : 0,5 €/kg  
 Acier moy. Allié : 2-3 euros/kg  
 Acier très allié > 10 €/kg

⇒ Utilité pour le concepteur

Si les contraintes mécaniques l'imposent, le traitement doit être total dans la masse

Augmenter la vitesse de refroidissement



Changement de fluide de tremp. Refroidissement plus rapide mais risque de déformations, voire de fissurations (tapures)

## **3-2. Transformations isothermes**

### **3-2.1. Généralités sur les courbes TTT**

### **3-2.2. Facteurs influençant les courbes TTT**

### 3-2.1. Généralités sur les courbes TTT

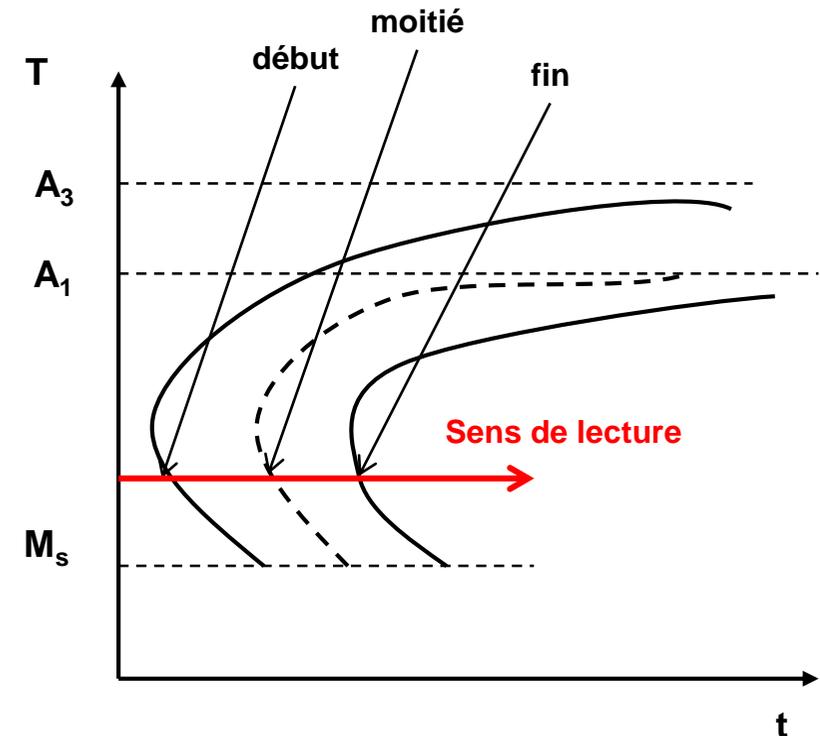
⇒ Construction du diagramme TTT

Série de courbes dilatométriques aux températures de maintien isotherme inférieure à  $A_3$

Tracé des courbes dites TTT représentant le déroulement de la transformation par trois lignes (début, moitié et fin)

Lecture de gauche à droite (et non de bas en haut comme le TRC)

TTT : Temps – Température – Transformation



### 3-2.1. Généralités sur les courbes TTT

Le diagramme TTT est valable pour un alliage déterminé, mais aussi pour une température d'homogénéisation donnée, et pour un temps de maintien fixé.

**Chaque température** de transformation étudiée doit être **atteinte le plus rapidement possible** ; ceci implique l'emploi de bains de sel ou de métaux fondus et limite aussi la dimension des pièces.

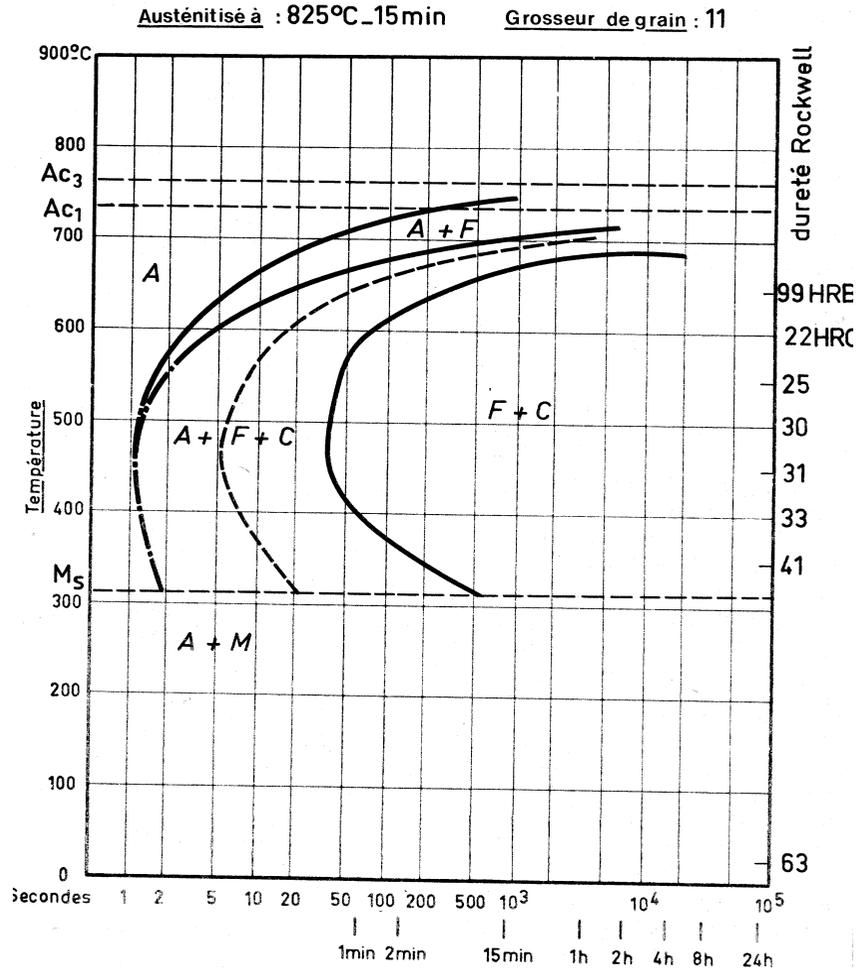


Maintien isotherme en bain de sel

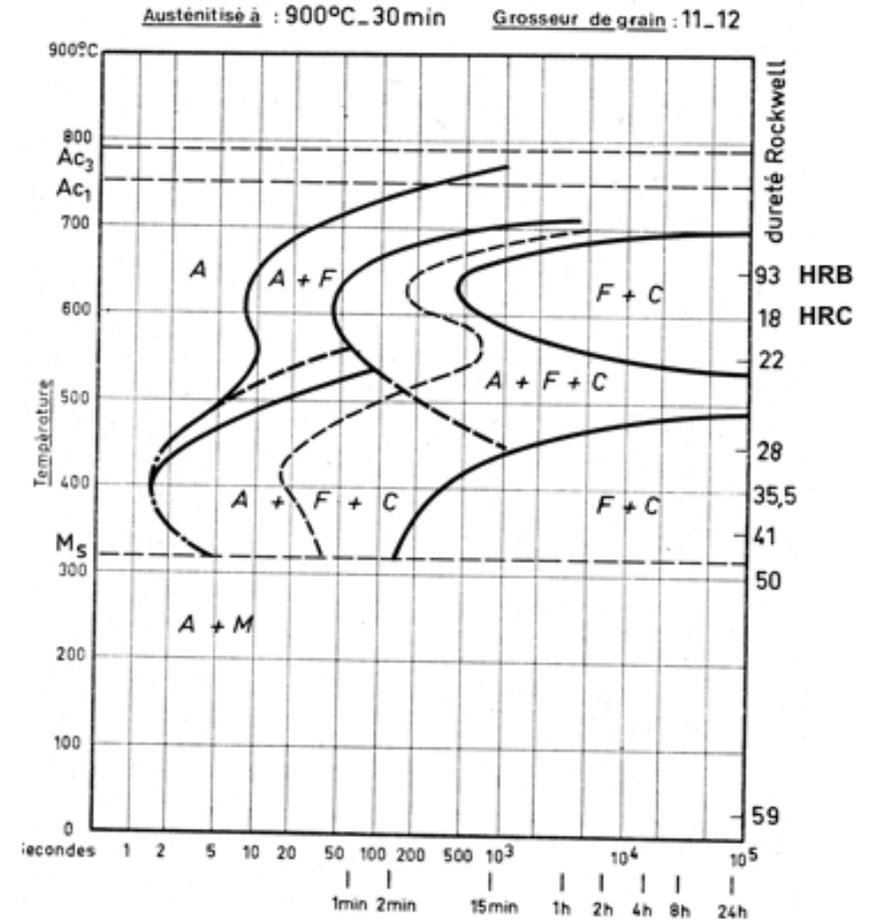
**Les diagrammes TTT ne doivent être lus que selon des isothermes.** Ils ne sont pas utilisables pour déterminer les transformations au cours d'un refroidissement.

Pour beaucoup d'alliages, il existe **plusieurs types de transformation** les unes se produisent à **haute température**, les autres ayant lieu à **basse température**.

⇒ Diagramme TTT d'un acier au carbone



⇒ Diagramme TTT d'un acier allié



Important!

### 3-2.2. Facteurs influençant les courbes TTT

⇒ **Composition chimique**

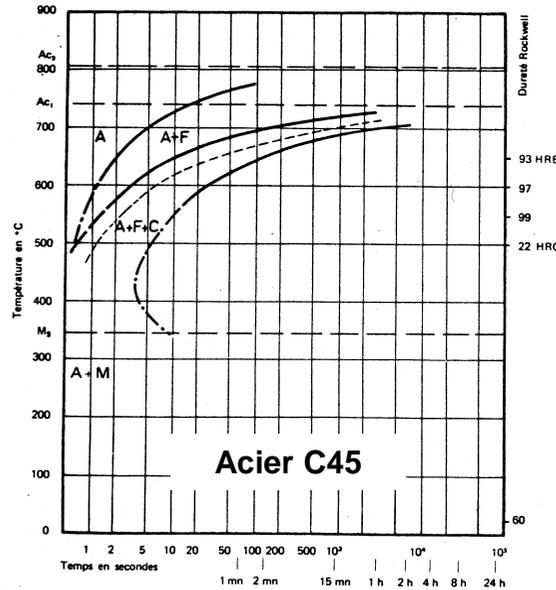
⇒ **Éléments d'alliages**

Tous déplacent les courbes vers la droite

Temps d'incubation (début de la transformation) plus longs

⇒ **Austénitisation**

Augmentation de la température d'austénitisation stabilise l'austénite ce qui pousse la courbe vers la droite (temps d'incubation plus long)

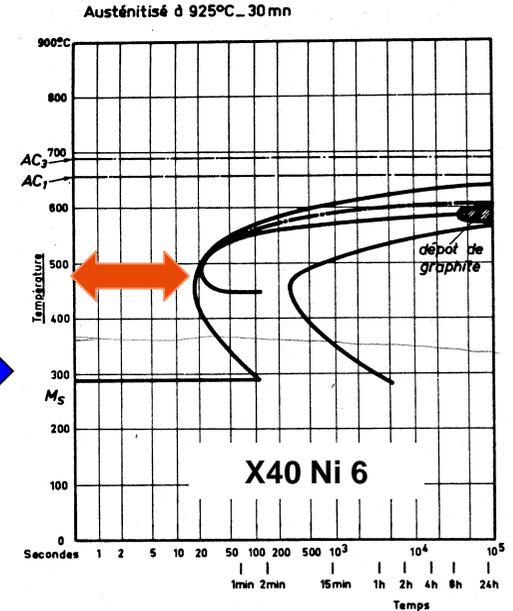


Augmentation du nickel

⇒ **Ségrégation**

Irrégularités de répartition des éléments provoquent une variation de la cinétique de la transformation

Élargissement des domaines



## Résumé

- **Les courbes TRC** représentent les résultats de la **transformation de l'austénite en refroidissement continu**.

Sur un diagramme TRC, les différentes zones définissent la transformation obtenue de l'austénite. Ces **zones sont atteintes en fonction de la vitesse de refroidissement du matériau**. On y retrouve la présence de la ferrite, la perlite, la bainite et la martensite.

En abscisse on trouve une échelle logarithmique du temps en secondes (voire minutes et heures). En ordonnée la température en degrés Celsius. Les différentes courbes qui partent du haut jusqu'au bas du diagramme caractérisent les vitesses de refroidissement que l'on doit utiliser en fonction de la dureté à obtenir.

**La dureté obtenue est définie au dessus de l'axe des abscisses.**

- **Le diagramme TTT indique les transformations isothermes** (à température constante) d'un matériau, suite à un refroidissement ultrarapide à partir d'une température d'austénitisation jusqu'à la température d'intérêt.

À la température d'austénitisation, l'austénite est stable. Suite au refroidissement rapide, au dessous de la ligne Ac3, l'austénite devient instable car portée à une température inférieure à sa température d'équilibre. Au bout d'un certain temps (temps d'incubation) elle commence à se transformer.

Sur chaque ligne isotherme on peut visualiser les temps de début et de fin des différentes transformations.