

1- Diagrammes d'équilibre: Notions et généralités

2- Diagrammes d'équilibre: Microstructure

3- Diagrammes d'équilibre: Alliages fer-carbone

4- Transformations isothermes et anisothermes

5- Traitements thermiques, thermo-mécaniques et chimiques
des alliages

6- Diffusion et durcissement structurale des alliages

7- Corrosion: Mécanismes et préventions

8- Rupture: Notions et généralités

Transformations isothermes

Diagrammes TTT (1/2)

Lamine HATTALI

IUT Cachan – 1^{ère} année Sciences des Matériaux

✉ lamine.hattali@u-psud.fr



Introduction

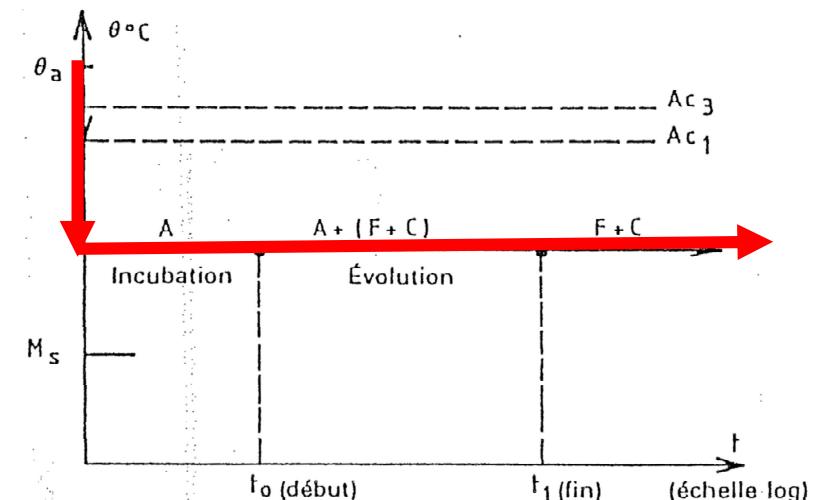
Pour étudier les développements de la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ dans des conditions hors équilibre, on peut, calquant la pratique industrielle, procéder à des refroidissements plus ou moins rapides ou plus ou moins lents au cours desquels on détermine les changements structuraux qui se produisent jusqu'au retour à la température ambiante. On effectue ainsi une étude dite en « **refroidissement continu** ». L'expérience a montré que les résultats obtenus peuvent parfois être très 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 procède, au préalable, 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** ».

Transformations isothermes

L'emploi de **traitements isothermes** permet d'étudier séparément l'influence des facteurs **temps** et **température** sur les transformations de l'austénite.

□ Un échantillon:

- de faibles dimensions
- austénitisé (θ_a , t_a)
- refroidi très rapidement à la température θ_i
- maintenu à la température θ_i



□ Des techniques expérimentales (micrographie, analyse, dilatométrique, analyse thermique, analyse magnétique permettent la mesure pour chaque température θ_i :

- de la nature des constituants
- de la microstructure
- des fractions volumiques



Bain de sel I pour le traitement thermique d'austénitisation et le **bain de sel II** pour le maintien isotherme

Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. sans diffusion

Paramètres

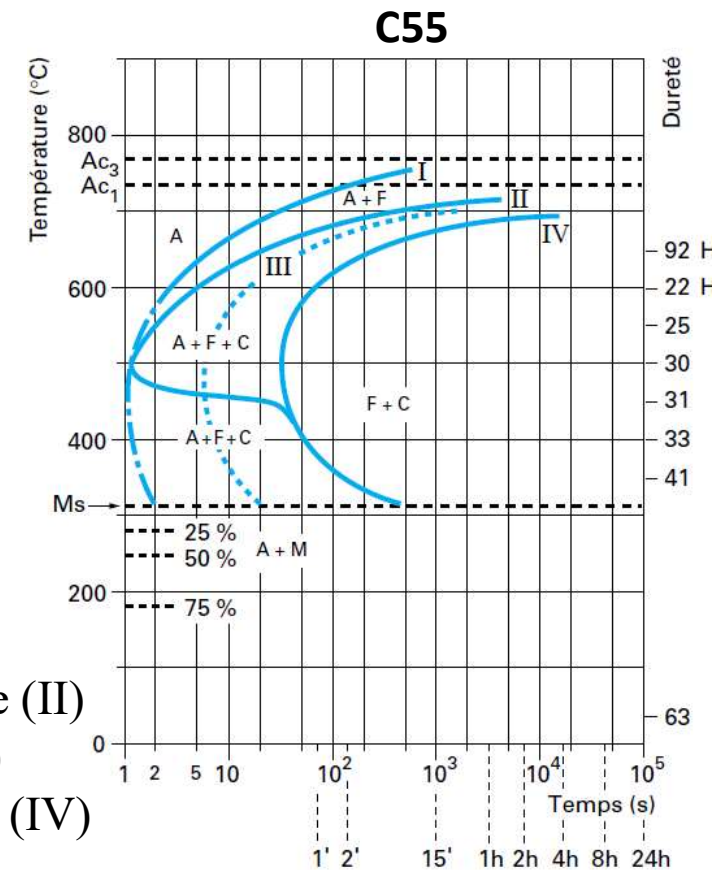
Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

**Diagramme de transformation en condition isotherme
Courbe TTT**

Notations IRSID :

- A : austénite
 - F : Ferrite
 - C : carbures formés lors de la transformation de A
 - c : carbures non dissous
 - M : Martensite
 - M_s : Martensite start
 - P : Perlite
 - B : Bainite
- La transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ débute (I)
 - Le type de constituant formé change (II)
 - 50% austénite sont transformés (III)
 - La formation d'un constituant cesse (IV)
 - La transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ s'achève



Acier austénitisé à 825°C pendant 15 min

Remarques importantes

Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. sans diffusion

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

- ❑ Le diagramme TTT est valable non seulement pour un *alliage déterminé*, mais aussi pour une *température d'homogénéisation donnée*, et pour un *temps de maintien fixé*.
 - ✓ la grosseur du grain austénitique $G \nearrow$ quand θ_a et $t_a \nearrow$
- ❑ Chaque température de transformation étudié 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*
- ❑ 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*.

Transformation avec diffusion

Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. sans diffusion

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

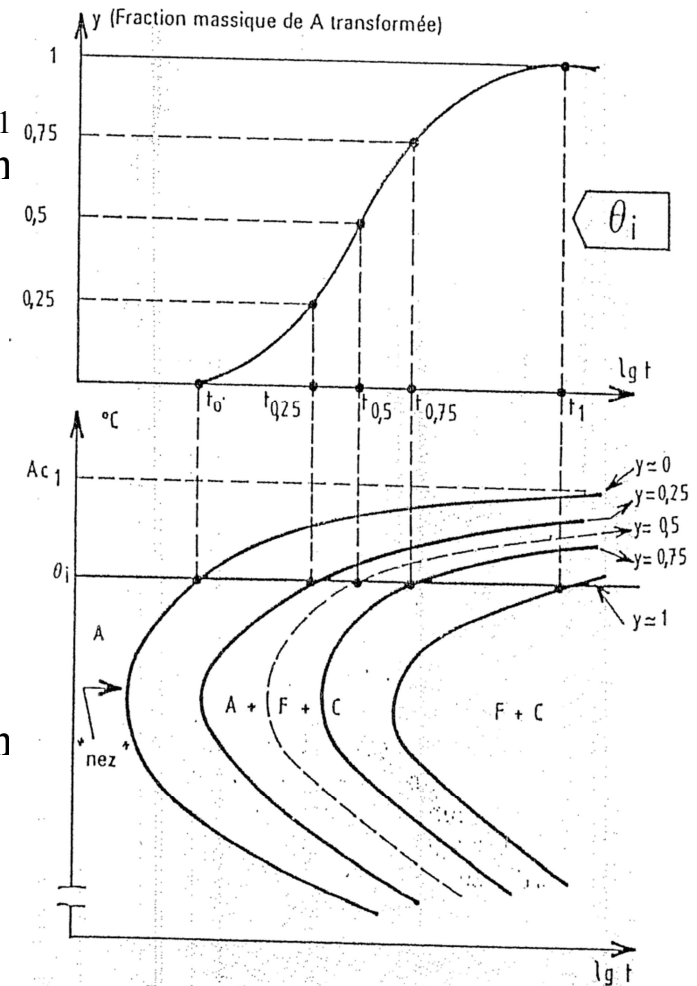
Transformation avec diffusion

□ Pour une température de maintien θ_i telle que $M_S < \theta_i < A_{C1}$ (A_{C1} température de transformation eutectoïde)



□ Les transformations isothermes de A conduisent à la formation d'agrégats Ferrite + Carbure.

□ Il existe un temps d'incubation (temps avant que la transformation avec diffusion ne commence) suivi d'un temps d'évolution.



Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. perlitique

Transf. bainitique

Résumé

Transf. sans diffusion

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

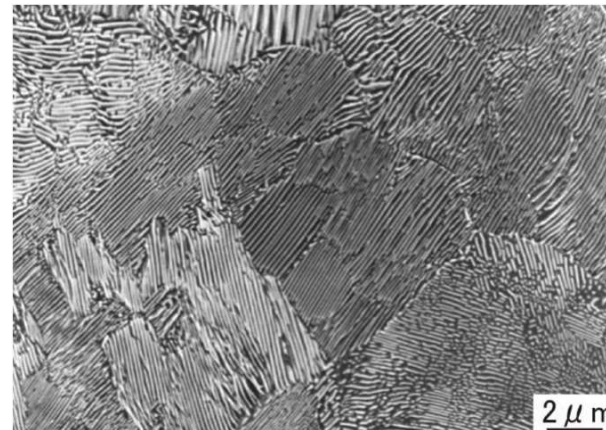
Transformation perlitique

Pour les températures de maintien **élevées** (mais toujours avec $\theta_i < A_{C1}$) il se produit une transformation perlitique :

Agrégat F + C = Perlite lamellaire

La phase nucléante est le carbure.

Si $\theta_i \nearrow$, l'espace interlamellaire diminue \Rightarrow dureté plus élevée.

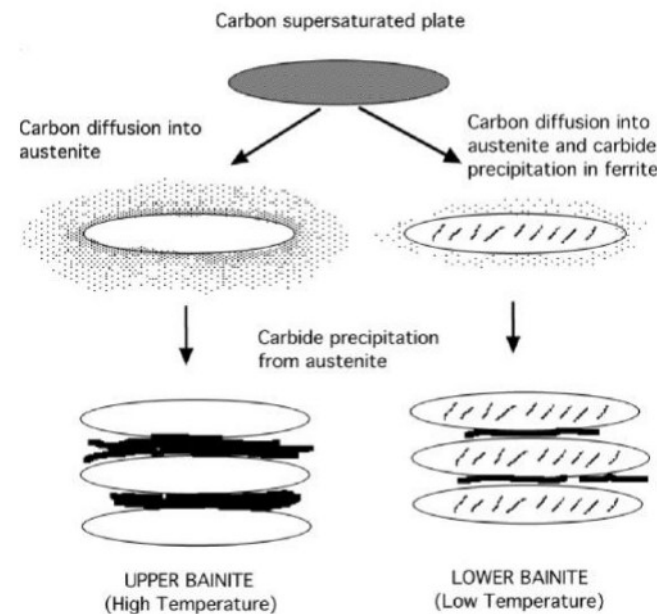


Structure perlitique fine

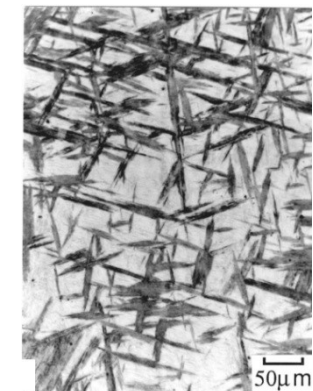
Transformation bainitique

Lorsque la température de maintien diminue (mais toujours avec $M_S < \theta_i$) la phase nucléante devient la ferrite, il se produit une transformation bainitique :

Agrégat F + C = Bainite supérieure ou inférieure



Bainite supérieure



Bainite inférieure

Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. perlitique

Transf. bainitique

Résumé

Transf. sans diffusion

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

Résumé des transformations avec diffusion

Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. perlitique

Transf. bainitique

Résumé

Transf. sans diffusion

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

Pour $\theta_i > M_S$, il existe 3 types de transformations isothermes qui donnent 3 types d'agrégats F + C de microstructures différentes.

Ces transformations peuvent se recouvrir.

On peut les classer *approximativement* en fonction de θ_i :

- de 700°C à 600C : A → P,
- de 600°C à 400C : A → B supérieure,
- de 550°C à M_S : A → B inférieure.

Transformation sans diffusion

Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. sans diffusion

Trempe

Austénite résiduelle

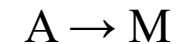
Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

Trempe martensitique

Si $\theta_i < M_S$, la transformation devient sans diffusion et est quasi-instantanée :



Effectuer la **trempe d'un acier** correspond à cette transformation de l'austénite en martensite.

Pour $M_F < \theta_i < M_S$, la transformation martensitique est incomplète, il reste de l'austénite résiduelle qui peut se transformer en agrégats F + C.



Structure martensitique

Trempe martensitique

Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. sans diffusion

Trempe

Austénite résiduelle

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

La fraction massique de A transformée en M est donnée par la relation empirique :

$$y = 1 - \exp[-k(M_S - \theta_i)^n]$$

Pour un acier hypoeutectoïde faiblement allié :

$$y = 1 - \exp[-0,011(M_S - \theta_i)]$$

M_S : température de transf. martensitique commençante

M_F : température de transf. martensitique finissante

(S : starting, F : finishing).

Attention au vocabulaire :

une transformation martensitique est instantanée !

Paramètres influençant les transformations de l'austénite

Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. sans diffusion

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

Composition :

Les éléments alliés (sauf Co et Al) en solution solide dans l'austénite abaissent M_S .

Relation empirique d'Andrews : pour %C < 0,6%

$$M_S(\%C) = 539 - 423\%C - 30,4\%Mn - 17,7\%Ni - 12,1\%Cr - 11\%Si - 7\%Mo$$

Conditions d'austénitisation :

si la taille de grain $G \nearrow$, le temps d'incubation $t_0 \nearrow$,

la taille de grain G n'a pas d'influence sur M_S

Exemples - Applications

Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. sans diffusion

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

Diagramme 42 Cr 4

Sont indiquées sur le diagramme :

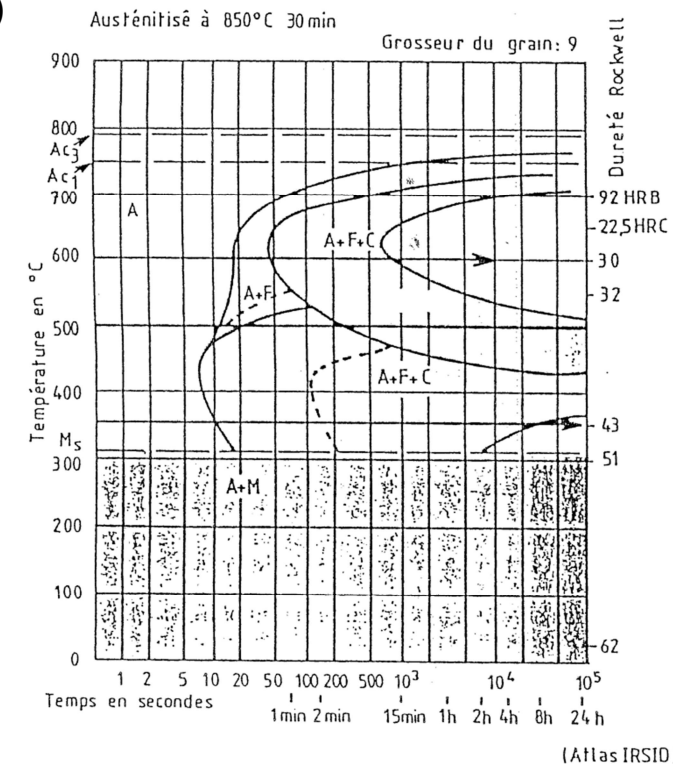
- la composition chimique,
- les conditions d'austénitisation (θ_a , t_a)
- la grosseur du grain obtenu.

On voit :

- Nez perlitique (625°C), temps de maintien : 50 s,
- Nez bainitique (425°C), temps de maintien : 7 s,
- Il existe un domaine A + F, ferrite properlitique. (La ferrite se forme lors d'une transformation isotherme)
- $M_s = 310^\circ\text{C}$

42 C 4

C%	Mn%	Si%	S%	P%	Ni%	Cr%	Mo%	Cu%
0,44	0,80	0,31	0,013	0,030	0,46	0,96	0,05	0,18



Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. sans diffusion

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

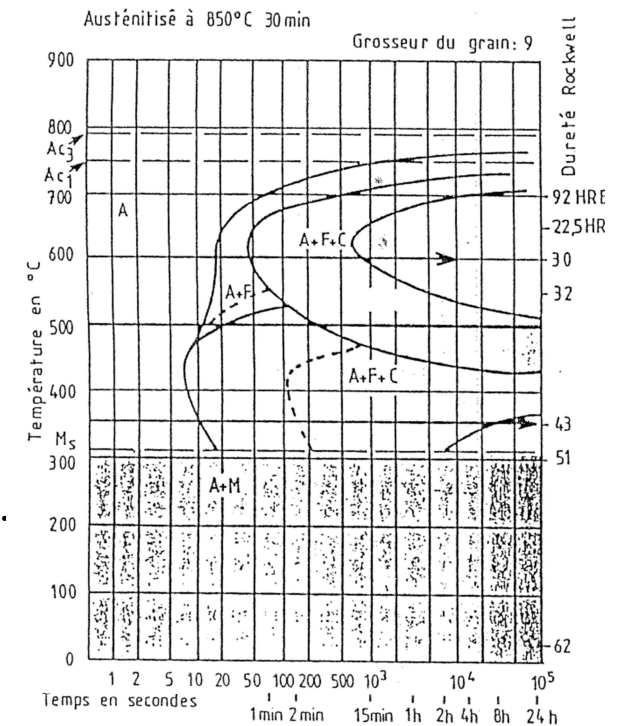
Pour $\theta_i = 600^\circ\text{C}$:

- temps d'incubation $t_0 = 20\text{s}$ (ferrite)
- puis apparition de perlite pour $t = 50\text{s}$
- transformation de A terminée après 15min
- à $t \rightarrow \infty$
 - composition : ferrite + perlite,
 - dureté : 30 HRC.
- Ligne pointillée : 50% de A est transformée.

Diagramme 42 Cr 4

42 Cr 4

C%	Mn%	Si%	S%	P%	Ni%	Cr%	Mo%	Cu%
0,44	0,80	0,31	0,013	0,030	0,46	0,96	0,05	0,18



Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

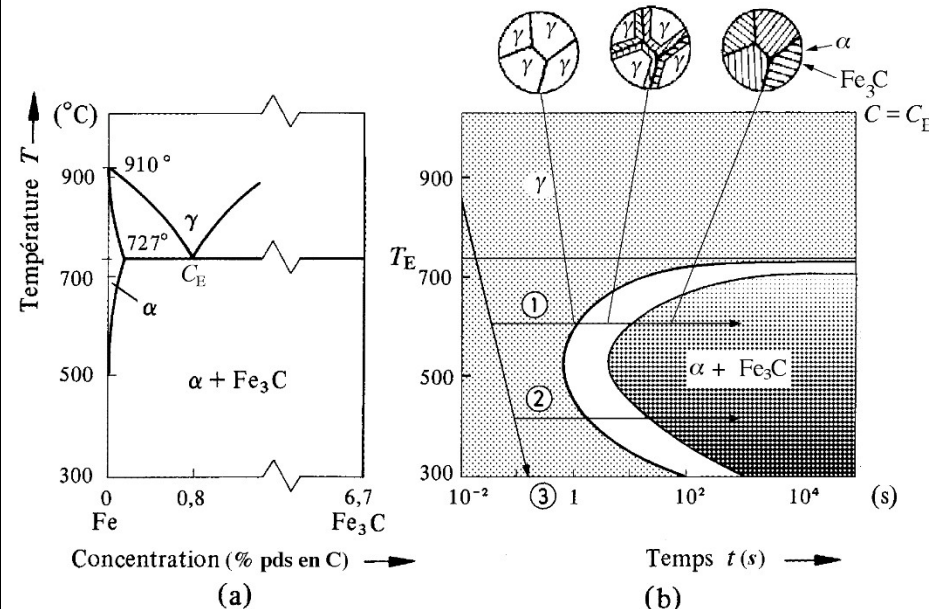
Transf. sans diffusion

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

Les câbles téléphériques



Téléphérique Steg-Petit-Cervin à Zermatt (Suisse)

- ① Structure perlitique épaisse (microstructures eutectoïdes lamellaires)
- ② Structure perlitique fine (la microstructures qui se développe devient plus fines, ce qui a pour effet d'augmenter de manière considérable la dureté et la limite élastique de l'acier (fabrication de câble de téléphérique))
- ③ Structure martensitique

Mise en œuvre d'une transformation isotherme

Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. sans diffusion

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

L'utilisation des traitements isothermes est limitée par :

- une taille de pièce limitée
- des difficultés de mise au point
→ développement industriel peu important

La majorité des traitements thermiques industriels de trempe sont réalisés par refroidissement continu

→ voir notre prochain cours « courbes TRC »

Ce qu'il faut retenir

Introduction

Transformation TTT

Austénitisation

Transf. avec diffusion

Transf. sans diffusion

Paramètres

Exemple – Applications

Ce qu'il faut retenir

- Différents types de transformations
- Noms des différents domaines du diagramme TTT
- Comment déterminer la nature des phases



Transformation anisothermes

Diagrammes TRC (2/2)

Introduction

La plupart des traitements thermiques appliqués aux aciers nécessitent un refroidissement continu jusqu'à température ambiante. Un diagramme de transformation isotherme (TTT) n'est valable que lorsque la température est constante, c'est pourquoi des modifications doivent y être apportées dans les cas où des transformations se produisent à température variable.

Exemple: *la trempe*

- Une trempe est un traitement thermique des métaux. Cette opération consiste à plonger un matériau chaud dans un fluide plus froid afin de le doter de propriétés nouvelles.
- Une courbe TRC permet d'étudier les transformations de l'austénite hors-équilibre en fonction
 - du milieu utilisé pour effectuer le refroidissement (air, eau, huile ...)
 - de la géométrie de la pièce



Introduction

Transformation TRC

Éléments d'alliages

Austénite résiduelle

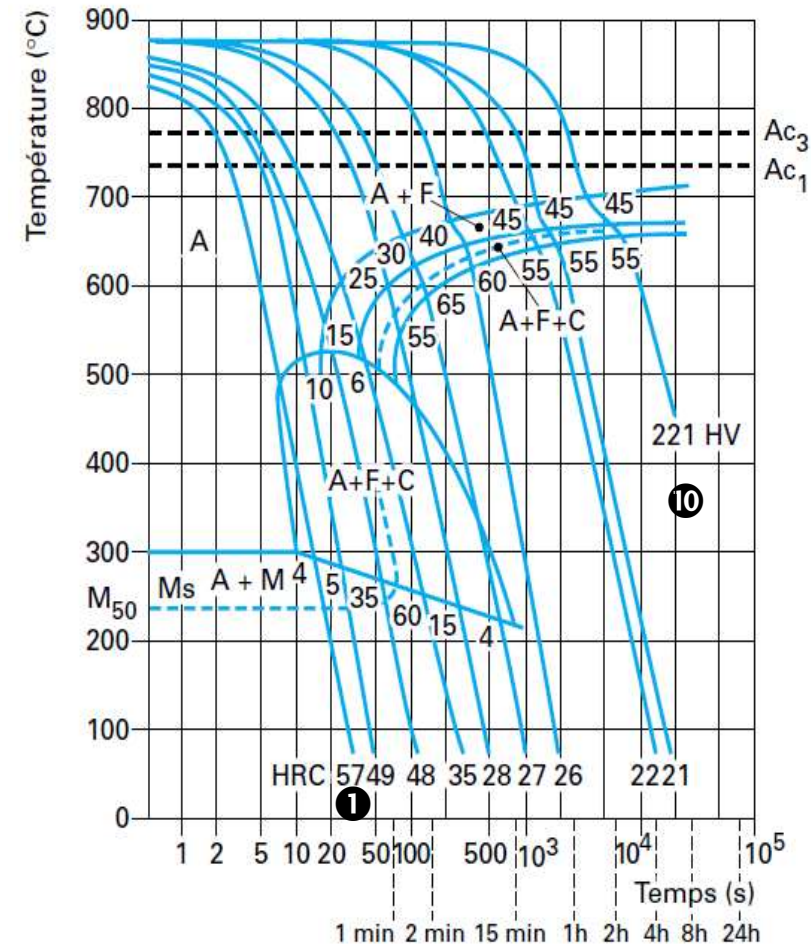
Propriétés mécaniques

Trempabilité

Ce qu'il faut retenir

- ❑ La loi de refroidissement ① correspond à l'évolution de la température au centre d'un rond de diamètre 10 mm refroidi à l'eau
- ❑ La loi de refroidissement ⑩ correspond à l'évolution de la température à la surface d'un rond de diamètre 900 mm refroidi à l'air

Acier 45 Mn 5



Nuance	Composition chimique (%)							
45 Mn 5	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu
	0,47	1,37	0,36	0,025	0,015	0,02	0,15	0,19
Acier austénitisé à 875 °C pendant 30 min								
Grosseur de grain AFNOR : 11 à 12								

Introduction

Transformation TRC

Éléments d'alliages

Austénite résiduelle

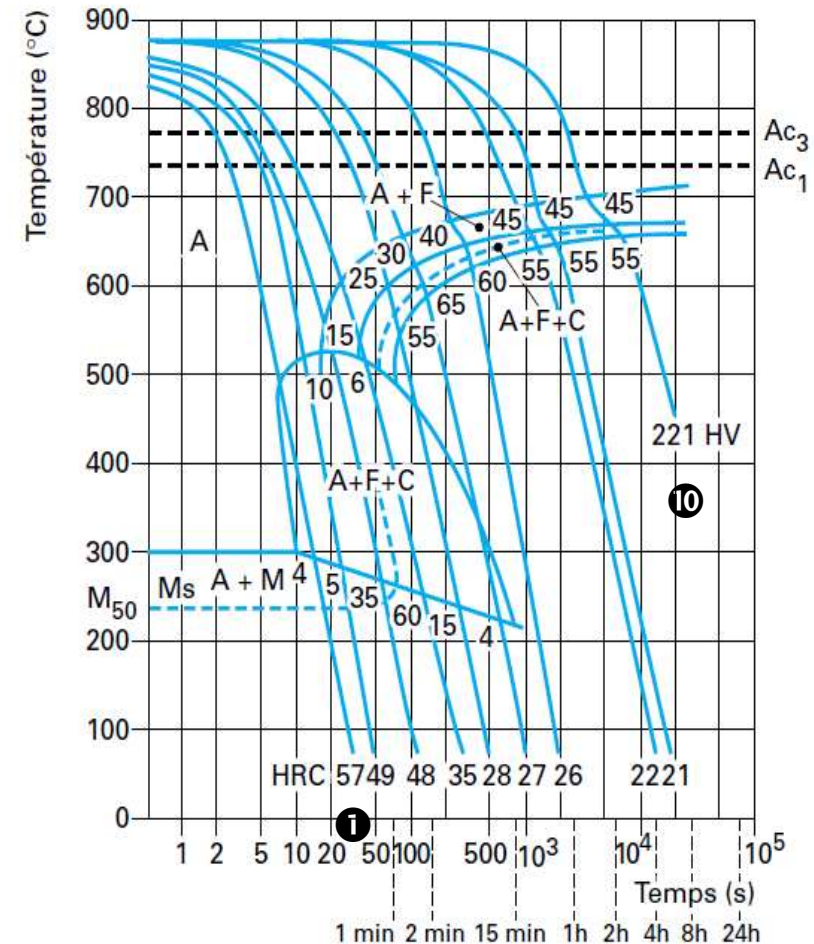
Propriétés mécaniques

Trempabilité

Ce qu'il faut retenir

- ❑ Les nombres indiqués le long d'une courbe particulière correspondent aux pourcentages massiques des constituants formés dans le domaine qu'on vient de quitter
- ❑ Les nombres indiqués à la fin d'une courbe particulière correspondent à la dureté du matériau après fin de transformation

Acier 45 Mn 5



Nuance	Composition chimique (%)							
45 Mn 5	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu
	0,47	1,37	0,36	0,025	0,015	0,02	0,15	0,19
Acier austénitisé à 875 °C pendant 30 min								
Grosseur de grain AFNOR : 11 à 12								

Introduction

Transformation TRC

Éléments d'alliages

Austénite résiduelle

Propriétés mécaniques

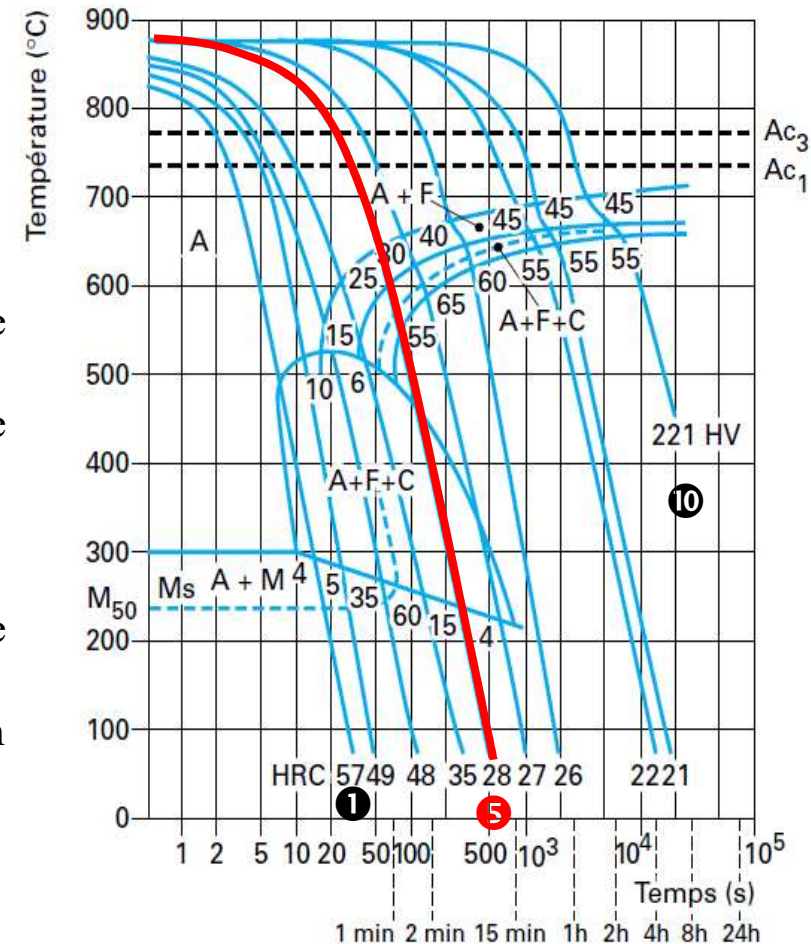
Trempabilité

Ce qu'il faut retenir

Loi de refroidissement (5)

- Temps d'incubation : $t_0 = 50s$
- $600^\circ C < T < 650^\circ C$: formation de ferrite properlitique ($y_F = 30\%$)
- $550^\circ C < T < 600^\circ C$: formation de perlite ($y_P = 55\%$)
- $460^\circ C < T < 550^\circ C$: aucune transformation
- $230^\circ C < T < 460^\circ C$: formation de bainite ($y_B = 15\%$)
- $T < 230^\circ C$: aucune transformation
- L'acier aura à l'ambiante la constitution suivante:
 - $y_F = 30\%$, $y_P = 55\%$, $y_B = 15\%$
 - Dureté HRC 28

Acier 45 Mn 5



Nuance	Composition chimique (%)							
45 Mn 5	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu
	0,47	1,37	0,36	0,025	0,015	0,02	0,15	0,19

Acier austénitisé à 875 °C pendant 30 min
Grosseur de grain AFNOR : 11 à 12

Introduction

Transformation TRC

Éléments d'alliages

Austénite résiduelle

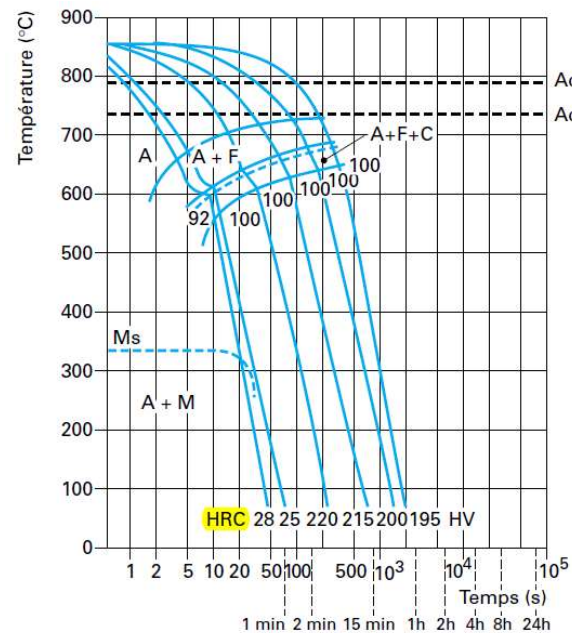
Propriétés mécaniques

Trempeabilité

Ce qu'il faut retenir

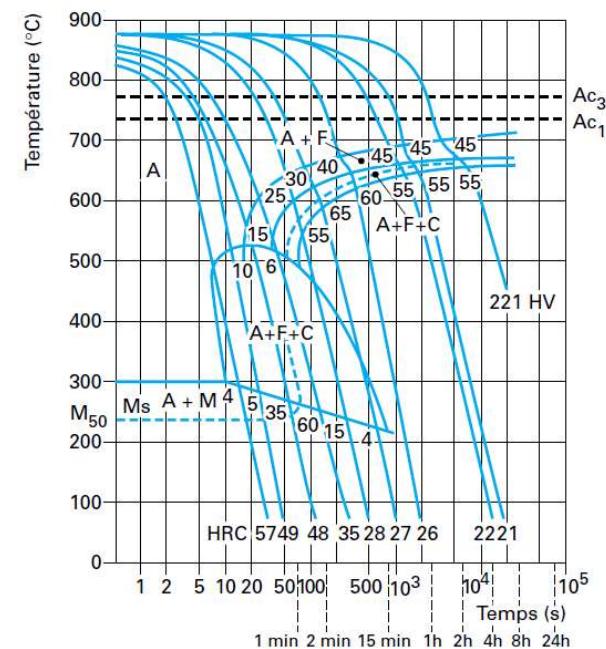
Influence des éléments d'alliages

□ Tous les éléments d'alliage, à l'exception du cobalt (Co), décalent les courbes vers la droite; le cobalt les décalent vers la gauche.



Nuance	Composition chimique (%)								
C 42	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	
	0,44	0,72	0,26	0,028	0,038	0,09	0,16	0,02	

Acier austénitisé à 850 °C pendant 30 min
Grosseur de grain AFNOR : 10



Nuance	Composition chimique (%)								
45 Mn 5	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu	
	0,47	1,37	0,36	0,025	0,015	0,02	0,15	0,19	

Acier austénitisé à 875 °C pendant 30 min
Grosseur de grain AFNOR : 11 à 12

Influence des éléments d'alliages

Introduction

Transformation TRC

Éléments d'alliages

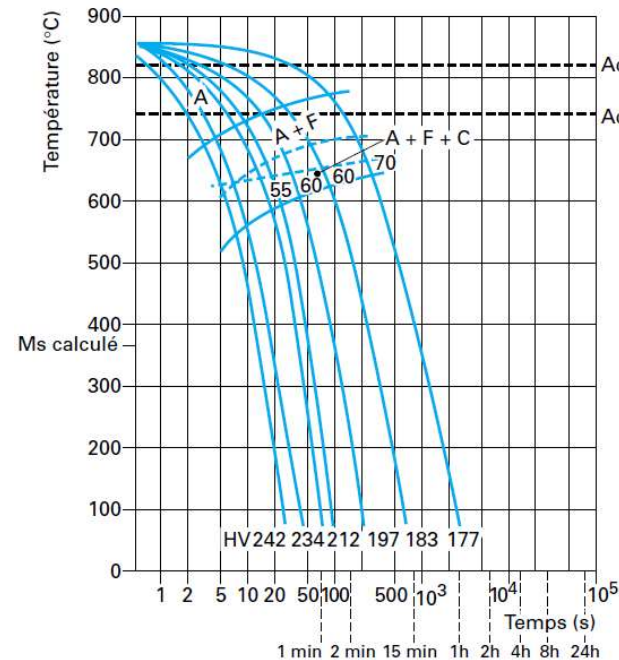
Austénite résiduelle

Propriétés mécaniques

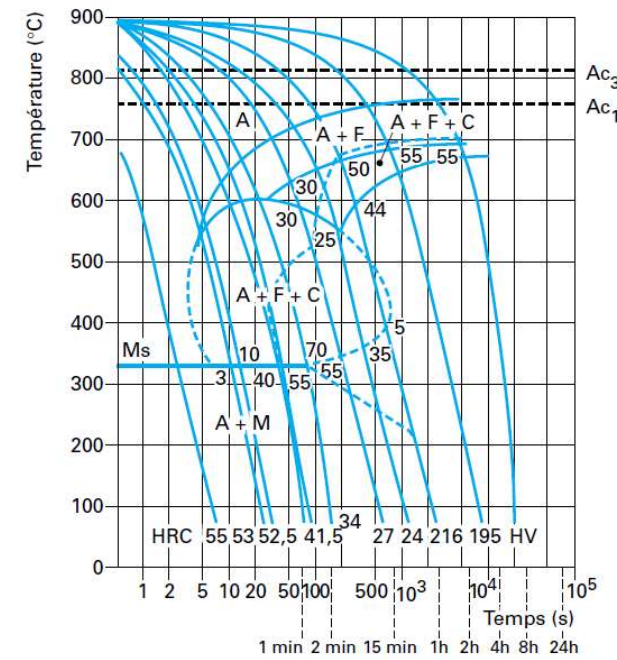
Trempabilité

Ce qu'il faut retenir

- Les éléments carburigène font apparaitre une discontinuité, voire une séparation entre le domaine supérieur (ferrite+perlite ou carbure+perlite) et le domaine bainitique.



Nuance	Composition chimique (%)								
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu
C 32	0,35	0,69	0,31	0,018	0,011	0,31	0,12	0,04	0,14
Acier austénitisé à 850 °C pendant 30 min Grosseur de grain AFNOR : 10									



Nuance	Composition chimique (%)								
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu
38 Cr 4	0,38	0,74	0,26	0,010	0,023	0,26	0,90	0,04	0,17
Acier austénitisé à 880 °C pendant 30 min Grosseur de grain AFNOR : 9									

Problème de l'austénite résiduelle

Introduction

Transformation TRC

Éléments d'alliages

Austénite résiduelle

Propriétés mécaniques

Trempabilité

Ce qu'il faut retenir

- ❑ Pour les nuances, pour lesquelles les teneurs en carbone et en éléments alliés sont suffisamment élevées, le point M_f se trouve nettement en dessous de la température ambiante. Après trempe il peut alors subsister une quantité d'**austénite résiduelle** plus ou moins importante.
- ❑ La présence de $A_{rés}$ peut avoir une influence sur:
 - Les *caractéristiques mécaniques*: diminution de R_m , R_e , H
 - La *tenue en fatigue* : selon les modes de sollicitation, il semble exister un taux d'austénite limite au-dessus duquel il y a dégradation de la limite d'endurance.
 - La **stabilité dimensionnelle**: la transformation $A_{rés} \rightarrow M$ peut avoir lieu par écrouissage (ex: piste de roulement des roulements à billes).

Problème de l'austénite résiduelle

Introduction

Transformation TRC

Éléments d'alliages

Austénite résiduelle

Propriétés mécaniques

Trempabilité

Ce qu'il faut retenir

- ❑ On peut diminuer la teneur en austénite résiduelle:
 - Par traitement par le froid ou cryogénique vers -80°C à -120°C
 - Par revenu après trempe
- ❑ On peut déterminer la teneur en $A_{\text{rés}}$ par :
 - Dilatomètre différentielle
 - Diffraction X
 - Par microscopie quantitative
- ❑ Par calcul: Méthode d'évaluation de la teneur en $A_{\text{rés}}$ (IRSID)

$$y_{A_{\text{rés}}} = (1-Y) \exp [-0,011(M_s - \theta_i)(1-\mu)]$$

$Y = y_F + y_P + y_B$ (fraction massique de A transformée avant M_s)

$\mu = 0,41[1 - \exp(-0,03(\Delta t_{300}^{700})^{0,6})]$ (loi de refroidissement (s))

θ_i : température atteinte pendant le refroidissement

Propriétés mécaniques de différents états structuraux

Introduction

Transformation TRC

Éléments d'alliages

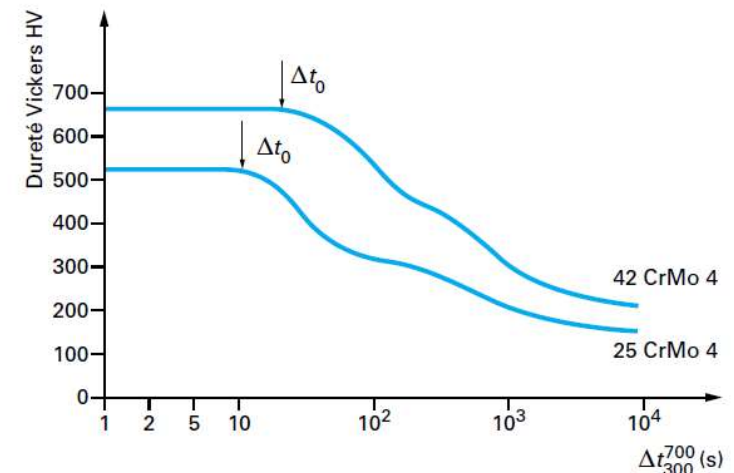
Austénite résiduelle

Propriétés mécaniques

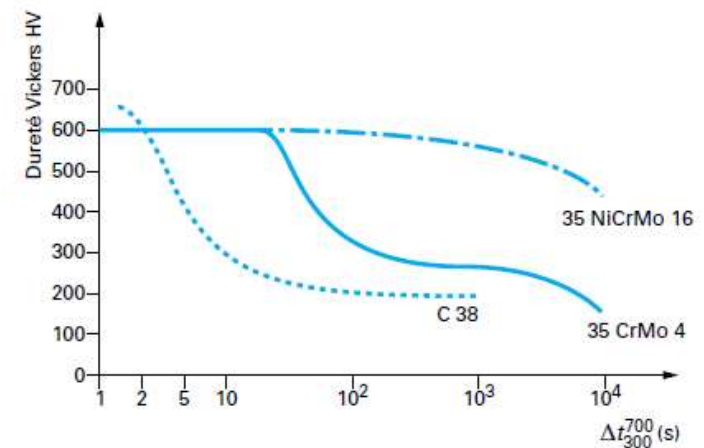
Trempabilité

Ce qu'il faut retenir

- ❑ Les variations des propriétés mécaniques en fonction des conditions de refroidissement peuvent être décrites quantitativement en terme de dureté en utilisant les diagramme TRC.
- ❑ Dans le domaine des faibles valeurs de Δt_{300}^{700} correspondant aux refroidissements les plus rapide, la dureté reste constante à un niveau élevé.
- ❑ Tout addition d'élément (sauf de cobalt) décale la courbe $HV=f(\Delta t_{300}^{700})$ vers la droite.



Δt_{300}^{700} = temps du passage à 300°C - temps du passage à 700°C



Trempabilité

Introduction

Transformation TRC

Éléments d'alliages

Austénite résiduelle

Propriétés mécaniques

Trempabilité

Ce qu'il faut retenir

Définition : La trempabilité d'un acier est son aptitude relative à éviter la formation d'agrégats ferrite-carbures (F+C) lors de refroidissements de plus en plus lents de la température d'austénitisation à la température de début de transformation martensitique (M_S).

C'est à dire :

□ plus le refroidissement qui entraîne la transformation $A \rightarrow F + C$ est lent, plus la trempabilité de l'acier est élevée

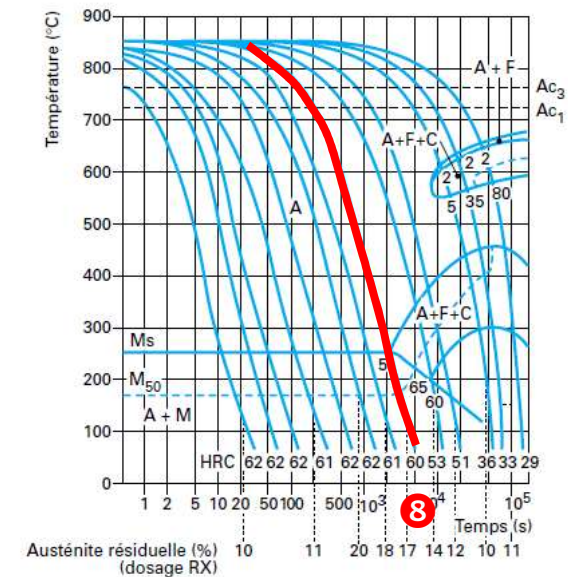
Vitesse critique de trempe

Pour déterminer quantitativement la trempabilité d'un acier on utilise la vitesse critique de trempe martensitique.

Définition : La vitesse critique de trempe martensitique est la vitesse de trempe minimale de refroidissement à réaliser pour éviter la formation d'agrégat Ferrite-Carbure (F+C)

Exemple : 60NiCrMo11-03

La vitesse critique de trempe martensitique est à déterminer sur la courbe de refroidissement 8.



Acier austénitisé à 850 °C pendant 30 min
Grosseur de grain : 9 à 10

Ce qu'il faut retenir

Introduction

Transformation TRC

Éléments d'alliages

Austénite résiduelle

Propriétés mécaniques

Trempabilité

Ce qu'il faut retenir

- Allure de la courbe de refroidissement
- Noms des différents domaines du diagramme TRC
- Comment déterminer la nature des phases
- Influence des éléments d'additions sur l'allure et les propriétés mécaniques
- Définition de la trempabilité d'un acier