

Transformations de phases solides

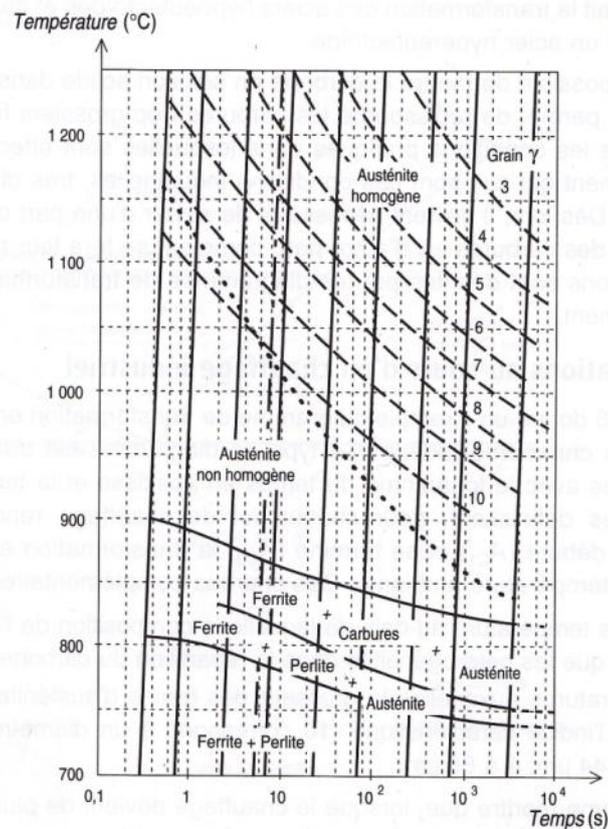
Un acier est un alliage fer carbone qui peut être entièrement austénitisé.

1. Austénitisation

L'austénitisation d'un acier se réalise au-dessus de la température A_{c3} pour un acier hypoeutectoïde. Naturellement le résultat dépendra de la vitesse de chauffage et de la température atteinte :

- plus on chauffe un acier, plus le grain sera gros
- plus la vitesse de chauffage sera rapide, plus il y aura retard à la transformation.

Ces facteurs sont visualisés sur la courbe ci-dessous obtenue sur un 35 CD 4 :



La grosseur du grain austénitique est caractérisée par un nombre entier G . G est calculé par la relation : $n = 8 \times 2^G$ où n est le nombre de grains par mm^2 . Ce nombre n est lui-même déterminé à partir de l'image du grain vue au microscope.

La forme des courbes $T = f(\log t)$ est hyperbolique et correspond à une relation de la forme : $t e^{-\frac{\Delta H}{RT}} = Cte$ où ΔH est l'enthalpie nécessaire pour réaliser la transformation et R la constante des gaz parfaits.

On note que l'on obtient : $\text{Ln}t - \frac{\Delta H}{RT} = Cte$ et par conséquent : $T = \frac{\frac{\Delta H}{R}}{\text{Ln}t - Cte}$ qui correspond bien à l'équation d'une hyperbole.

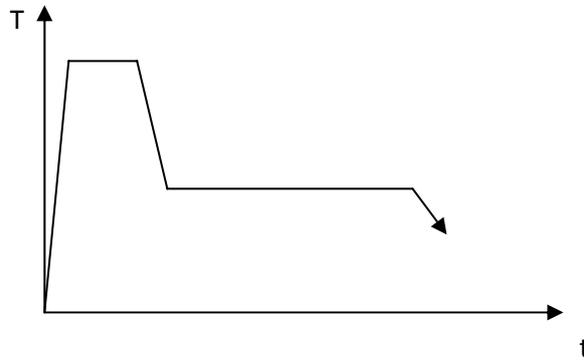
Exemple : $G = 8$ donne $n = 8 \times 2^8 = 2048$ grains/ mm^2

On a 2 couples T, t : (950 °C, 4000 s) et (1150 °C, 4 s)

$$\text{soit } \Delta H = \frac{R \text{Ln} \frac{t}{t'}}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T'}} = \frac{8,32 \times \text{Ln} \frac{4000}{4}}{\frac{1}{950+273} - \frac{1}{1150+273}} = 500100 \text{ J.mol}^{-1} = 5,2 \text{ eV/atome}$$

2. La transformation ferrito-perlitique des aciers

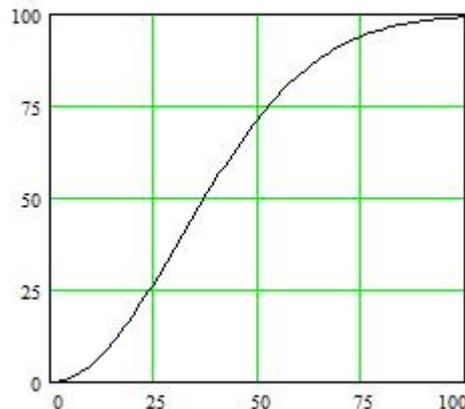
Le mécanisme général est celui de la germination et croissance. La transformation n'est possible que dans des conditions favorables de température inférieure à la température de la transformation et pour des germes de solides suffisamment petits. On suit les étapes de chauffages suivantes :



On obtient une transformation de l'austénite qui suit la loi d'Avrami :

$$\%A_{transformée} = 100 * (1 - e^{-kt^n}) \text{ avec } k \text{ et } n \text{ constantes.}$$

Avec $k = 5 \cdot 10^{-4}$ et $n = 2$, on obtient une courbe $T = f(t)$ de la forme :



On peut distinguer 3 zones, un temps d'incubation, un temps de réaction, un temps au-delà duquel la réaction est terminée.

Le diagramme réalisé pour un acier à 0,42 % C met en évidence ces différentes phases. Après austénitisation pendant 15 mn à 825 °C, on refroidit rapidement jusqu'à une certaine température puis on maintient pendant un certain temps.

La zone A + F correspond à l'apparition de la ferrite proeutectoïde. On est entre les températures A_{r3} et A_{r1} .

La zone A+F+C correspond à la transformation ferrito-perlitique. On note la courbe en tirets correspondant à 50 % d'austénite transformée.

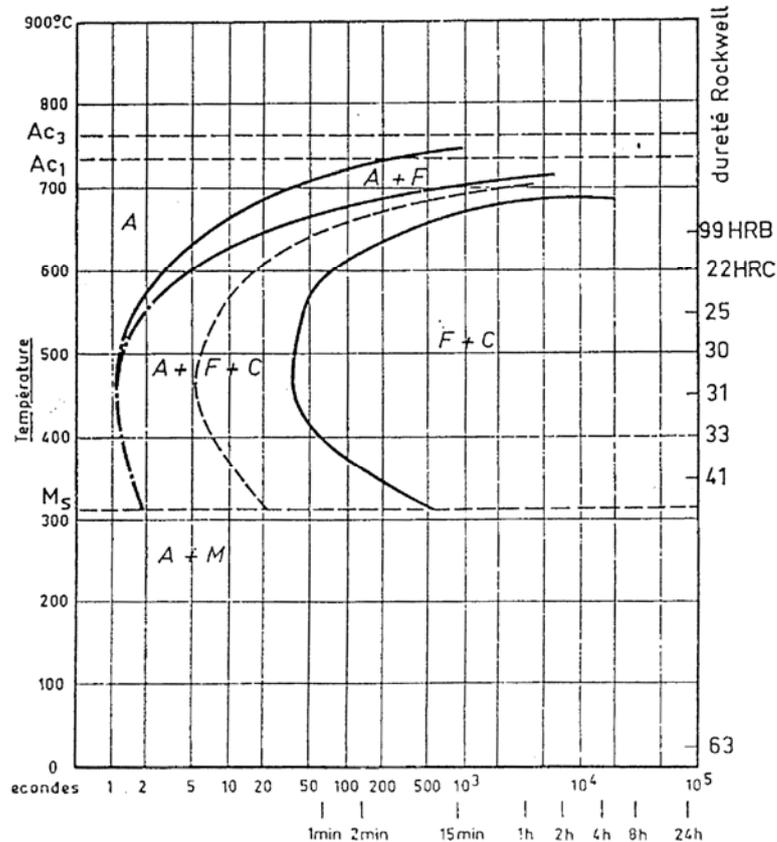
En dessous de M_s , on atteint la température de transformation martensitique qui sera étudiée ci-dessous et qui n'est pas du même type.

La courbe est appelée TTT pour taux de transformation, température, temps. Elle présente un nez, c'est-à-dire un minimum du temps d'incubation dû à 2 phénomènes contradictoires : plus la température diminue, plus la transformation est favorisée mais plus la cinétique est défavorisée.

Pour des aciers alliés, on aura éventuellement 2 ou 3 « nez » correspondants à la bainite supérieure et inférieure.

| C% | Mn% | Si% | S% | P% | Ni% | Cr% | Mo% | Cu% | V% |
|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|
| 0,53 | 0,70 | 0,35 | 0,010 | 0,020 | 0,24 | 0,09 | <0,10 | 0,52 | <0,03 |

Austénitisé à : 825°C_15 min Grosseur de grain : 11



3. La transformation martensitique de l'austénite

Pour une vitesse de refroidissement suffisamment rapide, la transformation ferrito-perlitique n'a pas le temps de se faire. En-dessous de la température M_s , l'austénite se transforme en martensite.

M_s est déterminée expérimentale. La relation d'Eldis permet de la calculer :

$$M_s = 531 - 391,2 \%C - 43,3 \%Mn - 16,2 \%Cr - 21,8 \%Ni$$

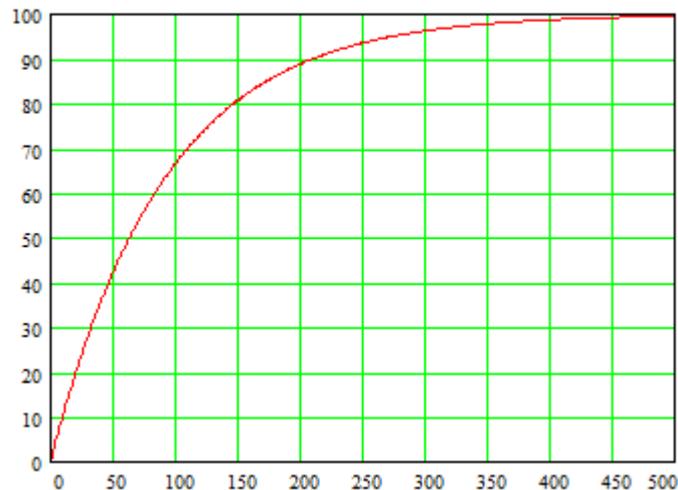
Cette transformation se fait dans des proportions qui ne dépendent que de la température et qui ne dépendent pas du temps. Les atomes ne se déplacent pas progressivement comme dans les autres transformations, ils le font à la vitesse du son.

On admet une relation de la forme : $\%A_{transformée} = 100(1 - e^{-0,011(M_s - T)})$.

On obtient ainsi les valeurs :

| %A transformée | $M_s - T$ |
|----------------|-----------|
| 50 | 63 |
| 90 | 209 |
| 99 | 419 |

et la courbe :



On comprend qu'une trempe cryogénique peut être nécessaire pour transformer le maximum d'austénite. On utilisera soit du dioxyde de carbone ou de l'azote liquide suivant la température qu'on veut atteindre. La trempe est suivie d'un revenu qui détend la martensite et permet la transformation de l'austénite restante.

4. Les courbes TRC transformations au refroidissement continu

Le refroidissement s'effectue dans différents milieux. Ils suivent plus ou moins la loi de Newton $P = hS \Delta T$ ou d'un point de vue cinétique $v = \frac{dT}{dt} = -k(T - T_f)$.

Comme pour les courbes TTT, la représentation se fait dans un repère $T = f(\log t)$.

Les différentes courbes de refroidissement peuvent être caractérisées par la détermination de la durée Δt_{300}^{700} , la vitesse moyenne $\overline{V}_{300}^{700} = \frac{400}{\Delta t_{300}^{700}}$ ou la vitesse

instantanée v_{700} calculée à l'aide de la relation $v = \frac{dT}{dt} = \frac{1}{2,3t} \frac{\Delta T}{\Delta \log t}$.

Il existe des relations permettant de calculer le % austénite non transformée à une température donnée.

On a par exemple :

$$\%A_{non\ transformée} = (100 - Y)(e^{-0,011(M_s - T)(1 - \mu)}).$$

avec $Y = \%F + \%P + \%B$ correspondant à la ferrite, perlite et bainite formées

$$\text{et } \mu = 0,41 \left(1 - e^{-0,03(\Delta t_{300}^{700})^{0,6}}\right).$$

Exemple acier 35 NC 6 :

$$A_{e1} = 727 - 10,7\%Mn - 16,9\%Ni + 29,1\%Si + 16,9\%Cr + 6,4\%W = 725,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A_{c3} = 912 - 203\sqrt{\%C} - 15,2\%Ni - 30\%Mn + 44,7\%Si + 104\%V + 31,5\%Mo + 13,1\%W = 765 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$M_s = 531 - 391,2 \%C - 43,3 \%Mn - 16,2 \%Cr - 21,8 \%Ni = 313,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pour la courbe aboutissant à 51 HRC,

$$\Delta t_{300}^{700} = 50 - 10 = 40 \text{ s}$$

$$\overline{V}_{300}^{700} = 400/40 = 10 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$v_{700} = \frac{1}{2,3 \cdot 10} \frac{430}{1} = 18,7 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$\mu = 0,41 \left(1 - e^{-0,03(40)^{0,6}}\right) = 0,0984$$

$$\%A_{non\ transformée} = (100 - 20) \left(e^{-0,011(314 - 20)(1 - 0,0984)}\right) = 4,33$$

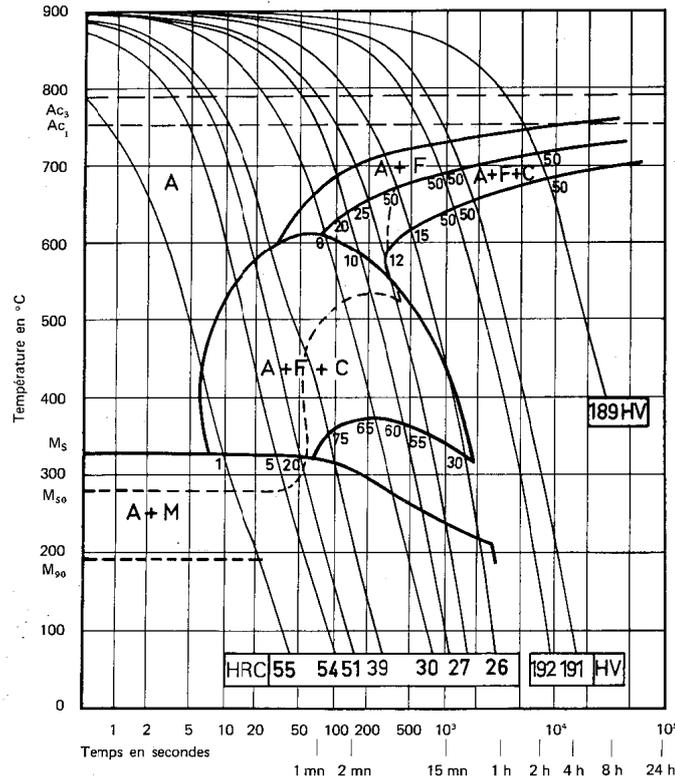
soit %M = 100-20-4,33 = 75,7

35 NC 6

| C % | Mn % | Si % | S % | P % | Ni % | Cr % | Mo % | Cu % | V % |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| 0,41 | 0,65 | 0,24 | 0,007 | 0,014 | 0,93 | 0,80 | 0,06 | 0,10 | 0,010 |

Austénitisé à 900 °C 30 mn

Grosseur du grain : 11-12



5. Le revenu des aciers

Après la trempe martensitique, il faut adoucir l'acier et terminer la transformation de l'austénite non transformée. Le diagramme TTT permet de comprendre ce qui se passe.

4 stades se succèdent :

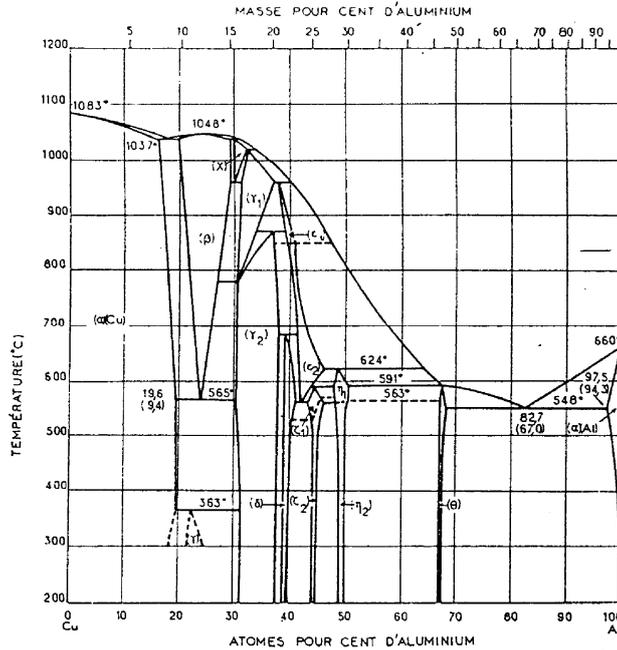
- La martensite se sature à 0,2 % de carbone,
- L'acier se contracte et se forme des carbures $Fe_{2,4}C$ notés ϵ et Fe_3C_2 notés χ ,
- Il se forme de la cémentite sphéroïdale,
- Au-delà avec des aciers alliés, il se forme des carbures fins et durs.

Le revenu de détente se réalise à 150-200 °C. Le revenu d'adoucissement se pratique à 500-600 °C. Entre 200 et 500 °C, le résultat est une fragilisation qui est donc évitée.

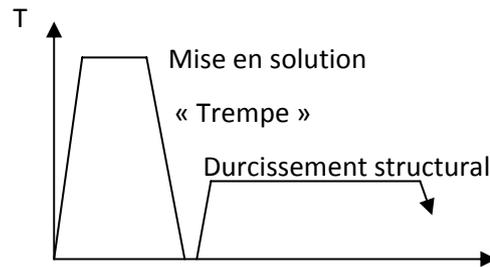
On joue sur la durée et la température du revenu avec la relation : $te^{\frac{\Delta H}{RT}} = Cte$ que l'on présente aussi sous la forme donnée par Hollomon-Jaffe : $T(a + \log t) = Cte$.

6. Le durcissement structural

L'exemple classique se réalise avec un alliage noté AU 4 G à base d'aluminium, de 4 % de cuivre et de magnésium.



Le traitement thermique est le suivant :



Initialement, l'alliage est constitué des 2 phases α et θ . Un chauffage jusque vers la température de 550 °C permet la mise en solution du cuivre dans l'aluminium. On réalise un refroidissement rapide qui fige la solution mais ne la durcit pas. On réchauffe ensuite jusque vers 150 °C et on maintient pendant plusieurs heures. C'est alors que se forment des petits précipités cohérents avec la matrice de phases θ'' et θ' . Ce sont les zones de Guinier-Preston qui confèrent la dureté à l'alliage. Si l'on maintient trop longtemps, on revient à la situation initiale. Le schéma ci-dessous représente les 3 situations successives :

