
CHAPITRE 4

LES TRANSFORMATIONS A L'ETAT SOLIDE DES ALLIAGES Fe-C

Contenu :

- ☞ Austénitisation des aciers
- ☞ Les transformations isothermes
- ☞ Les transformations anisothermes
- ☞ Trempe et revenu des aciers

Plan du cours

Objectifs généraux

- ☞ Etablir un processus expérimental de traitement thermique des aciers ;
- ☞ Choisir le traitement adéquat, ses paramètres et le mode opératoire, du refroidissement, associé pour répondre à une exigence industrielle donnée.

Objectifs spécifiques

- ☞ Décrire les cinétiques thermodynamiques des transformations hors équilibre sur un diagramme TTT ;
- ☞ Décrire les cinétiques thermodynamiques des transformations hors équilibre sur un diagramme TRC ;
- ☞ Caractériser la trempabilité des aciers à travers un essai Jominy ;
- ☞ Connaître les principaux traitements de tempe et revenu.

Déroulement

Le chapitre sera abordé durant 5 séances de 1h:30min qui sera réparties comme suit :

- ☞ Première séance : Austénitisation des aciers & transformation TTT
- ☞ Deuxième séance : Etude des transformations TRC
- ☞ Troisième séance : Trempabilité, trempé et revenu des aciers ;
- ☞ Quatrième séance : correction d'une application de synthèse.

Prérequis

- ☞ Etude des diagrammes des phases à l'équilibre
- ☞ Transformations structurales à l'état solide

Evaluation

Réussir plus de 70% d'une application de synthèse et des TD proposés

Sommaire

Introduction

1. Austénitisation des aciers avant traitement thermique	57
1.1. Condition d'austénitisation	57
1.2. Paramètres d'austénitisation	58
1.3. Vitesse de chauffage	58
1.4. Température d'austénitisation	58
1.5. Durée d'austénitisation	59
2. Transformations isothermes de l'austénite hors équilibres	60
2.1. Les transformations avec diffusion	60
2.1.1. La transformation perlitique	61
2.1.2. La transformation bainitique	61
2.2. Transformation sans diffusion ou martensitique	62
2.3. Les traitements isothermes (les courbes T.T.T)	63
2.3.1. Les diagrammes T.T.T en courbes iso austénitiques	63
2.3.2. Exercice d'application	64
2.4. Les traitements thermiques isothermes industriels des aciers	65
2.4.1. La trempe étagée martensitique (Martnipping)	65
2.4.2. La trempe étagée bainitique (Austenipening)	65
2.4.3. La trempe étagée perlitique en recuit isotherme	66
2.4.4. La trempe étagée austéniformage (Ausforming)	66
3. Transformation anisothermes de l'austénite : Courbe TRC	67
3.1. Mise en œuvre des diagrammes TRC	67
3.2. Exercice d'application	68
3.3. Vitesse critique de trempe	63
4. Etude de la trempabilité à partir de l'essai JOMINY	69
4.1. Nécessité industrielle	69
4.2. L'essai JOMINY	69
5. Revenu après trempe des aciers	71
5.1. Intérêt industriel	71
5.2. Conditions d'exécution d'un revenu	71
5.3. Les différents types de revenu	71
5.4. Evolution des propriétés au cours de revenu	72
5.5. Influence de la composition chimique	73
6. Traitements de recuit des aciers	74
6.1. Principes et but de recuit	74
6.2. Les différents types de recuits	74
7. Application de synthèse	80

Introduction

Les industries **mécaniques** utilisent des **aciers de construction** pour traitement thermique qui doivent avoir les propriétés optimales qui leur permettent de satisfaire aux exigences imposées par les sollicitations auxquelles ils sont soumis pendant leur service. Dans ces conditions, il est nécessaire (techniquement mais aussi économiquement) que leurs caractéristiques de résistance soient portées aux valeurs maximales compatibles avec les niveaux que doivent atteindre les caractéristiques de ductilité pour assurer la sécurité du fonctionnement en service.

Mais les mécaniciens demandent, le plus souvent que la mise en œuvre des aciers soit facile, c'est-à-dire que leurs propriétés soient telles que l'usinage ou la mise en forme à froid, pour ne prendre que les moyens de mise en forme les plus utilisés, soient réalisables dans les conditions techniques et économiques jugées les plus intéressantes. Cela exige que les caractéristiques de résistance de l'acier soient plus ou moins voisines des valeurs minimales qu'elles peuvent prendre (et que les caractéristiques de ductilité atteignent leurs valeurs maximales) et donc que l'acier ait été préalablement adouci.

1. Austénitisation des aciers avant traitement thermique

Pour conférer à l'acier de hautes caractéristiques de résistance, on peut mettre en jeu différents mécanismes de durcissement mais on doit constater que le plus efficace est celui qui fait intervenir la formation de précipités (le plus souvent des carbures de fer ou des carbures d'éléments d'alliage) au sein des grains de fer. Ce mode de durcissement, commun à de nombreux métaux, est réalisé selon le schéma général, à travers trois opérations successives : Austénitisation, trempe et revenu.

1.1. Condition d'austénitisation

La **mise en solution des précipités**, est rendue nécessaire par le fait que ces derniers, après solidification, sont généralement beaucoup trop gros par rapport aux dimensions optimales qui permettraient de parvenir au durcissement maximal. Ici, pour pouvoir mettre les carbures en solution, il faut porter l'acier à une température telle que le fer ait acquis sa structure cubique face centrée ($fer\gamma$) qui peut dissoudre (en solution interstitielle) le carbone présent (contrairement au fer cubique centré, $fer\alpha$, dans lequel le carbone est pratiquement insoluble). On transforme ainsi l'acier en solution solide de carbone dans le $fer\gamma$, l'austénite. L'opération s'appelle « **austénitisation** ».

En conséquence, cette dernière s'effectue selon deux conditions essentielles dont la première est métallurgiques (existence d'un domaine austénitiques sur le diagramme des phases à l'équilibre) tandis que la seconde est thermique (possibilité de refroidir la nuance austénitisée à une vitesse plus rapide qu'à l'air calme pour qu'on puisse mettre des structure hors équilibre.)

1.2. Paramètres d'austénitisation

L'opération d'austénitisation consiste à chauffer l'acier jusqu'à une température du domaine de l'austénite. Tous les éléments d'alliage sont sensés se mettre en solution solide dans ce domaine. L'état antérieur de l'acier constitué de perlite se transforme à partir de A_{c1} progressivement en austénite. Le mécanisme de transformation est simple : autour d'un grain de ferrite et d'un grain de cémentite, il y a naissance du germe d'austénite. Ce germe est formé par transformation eutectoïde avec une composition chimique à son apparition de 0.8%C.

1.3. Vitesse de chauffage

L'opération de chauffage d'un acier à sa température d'austénitisation doit considérer en particulière sa composition chimique, sa structure cristalline, la forme de la pièce et de ses dimensions. Le chauffage à une vitesse donnée entraîne automatiquement un gradient thermique entre la surface et le cœur de la pièce et un décalage dans la température de transformation ($\alpha \rightarrow \delta$). Ces deux facteurs sont d'autant plus importants que d'une part la vitesse de chauffage soit plus grande et d'autre part la conductibilité thermique est faible. Ils entraînent par état de conséquence la naissance de contrainte interne d'autant plus importante que l'acier est chargé en carbone et en élément d'alliage.

Lorsque l'acier est confronté à la naissance d'une forte densité de contrainte, il doit être soumis à un chauffage à vitesse lente. Il s'agit soit de chauffage contenu ou de chauffage par étape avec maintien isotherme à des températures intermédiaires et notamment autour de point de transformation A_{c1} .

1.4. Température d'austénitisation

Le choix de la température d'austénitisation dépend du meilleur rendement du traitement. Elle est fonction des propriétés du produit de transformation qui varient selon une austénitisation complète ou partielle. L'austénitisation complète conduit à une mise en solution de tous les éléments d'alliage dans la maille CFC de l'austénite. La température correspondante à l'austénitisation complète est située au-dessus de A_{c3} pour les aciers hypo eutectoïdes et A_{cm} pour les aciers hyper eutectoïdes quant à l'austénitisation partielle, elle concerne le domaine mixte ($\delta + Fe_3C$) du diagramme d'équilibre Fe-C relatif aux aciers hyper eutectoïdes le niveau de température choisi est situé entre A_{c1} et A_{cm} .

Remarque : Il faut préciser que le niveau de température dans ce domaine influe sur le grosseur des grains austénitiques et donc sur la qualité des propriétés après traitement.

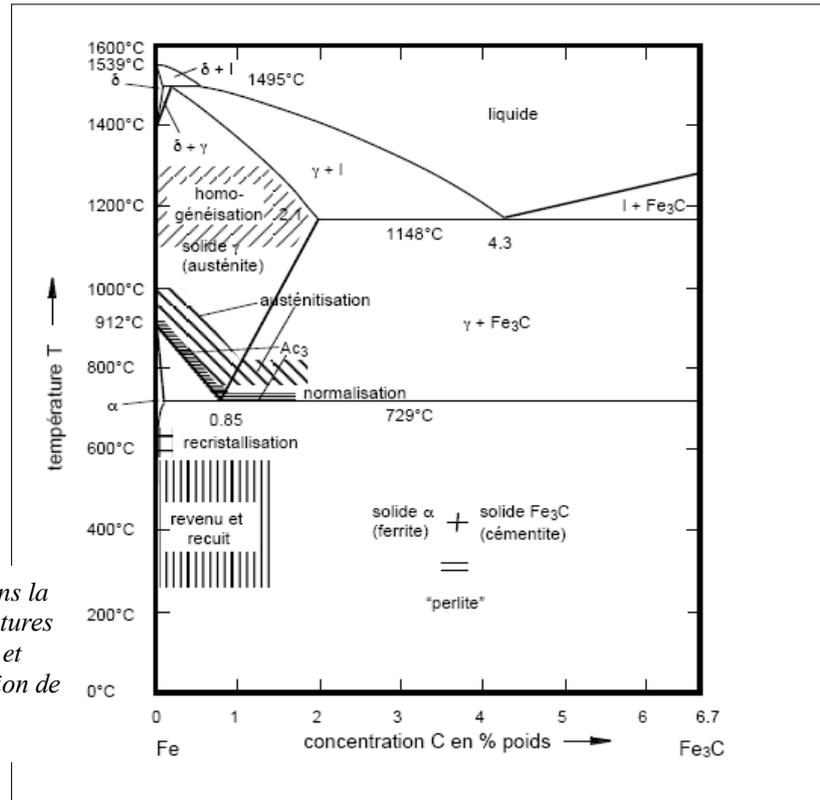


Fig.1. Le diagramme de phase Fe-C dans la gamme d'intérêt technique. Les températures des différents traitements thermiques et d'austénitisation sont indiquées en fonction de la teneur en carbone.

1.5. Durée d'austénitisation

L'austénitisation nécessite un temps de maintien t_a (fonction de la massivité de la pièce) à la température T_a pour l'homogénéisation et la mise en solution totale des éléments d'alliage présent dans les aciers. Ce temps est d'autant plus grand que T_a est moins élevée et réciproquement.

Remarque : ces deux facteurs (t_a et T_a) ont, tous les, deux une influence sur le grossissement des grains δ avec un avantage pour T_a (figure 2).

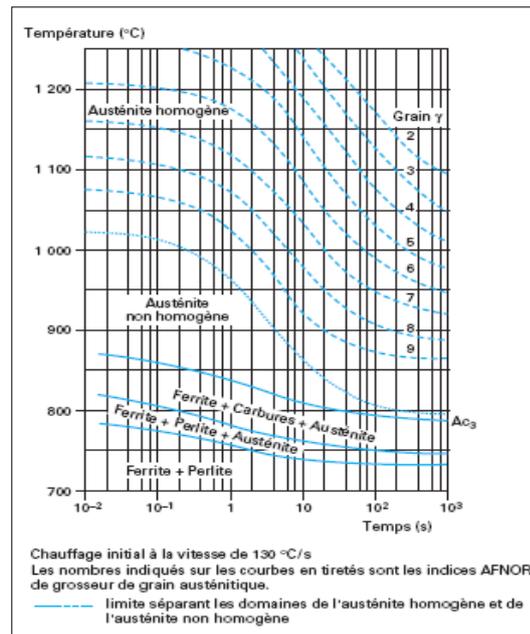
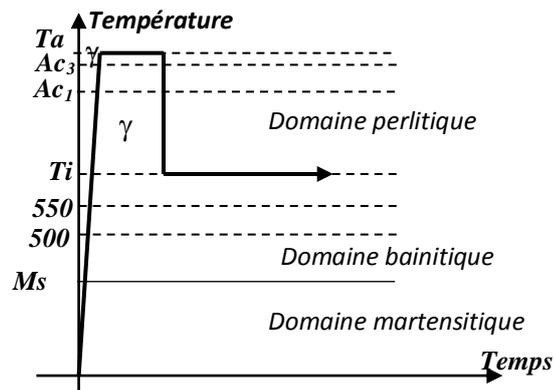


Fig. 2. Diagramme de transformation isotherme ($\alpha \rightarrow \delta$) (cas d'un acier 35CrMo4)

2. Transformations isothermes de l'austénite hors équilibres

L'emploi des traitements isothermes permet d'étudier séparément l'influence du temps et de la température sur les transformations de l'austénite. Un échantillon de faible dimension est austénitisé puis refroidi très rapidement jusqu'à une température $T_i < A_{c1}$, puis maintenu à cette température lors du passage rapide de T_a à T_i , l'austénite ne subit aucune évaluation.

Fig. 3. Types de transformations (perlitique pour les températures élevées, bainitique pour les moyennes et martensitique pour les basses températures)



On note que les différents domaines des transformations isothermes sont fonction des compositions chimiques des nuances et traitées. Un autre domaine peut être, éventuellement, présent pour certaines nuances c'est le domaine de transformation ferritique, c'est le cas des nuances 42Cr4, C55, 40WCrMoSi35-12, etc. On distingue deux classe de transformation métallurgique de l'austénite en conditions isothermes : avec ou sans diffusion.

2.1. Les transformations avec diffusion

Lorsque la température de maintien T_i est comprise entre celle du point A_{c1} et celle du point M_s les transformations isothermes de l'austénite conduisent à la formation d'agrégats ferrite-carbone ($A \rightarrow (F + C)$) mettant en jeu des phénomènes de diffusion qui régissent la cinétique de ce type de transformations.

A une température de maintien isotherme T_i déterminée, la transformation de l'austénite (A) débute après un certain temps d'incubation t_0 et déterminer au bout du temps t_1 . Entre t_0 et t_1 , l'austénite se transforme progressivement en ($F + C$) et les moyens expérimentaux permettent d'évaluer le temps t_y au bout duquel la fraction massique (y) d'austénite s'est transformée.

Ainsi, on peut tracer un faisceau de courbe iso-austénitique définissant pour chaque valeur de T_i la cinétique de transformation de l'austénite. L'ensemble de ces points critiques de transformation permettent de construire le diagramme TTT (température, temps, transformation)

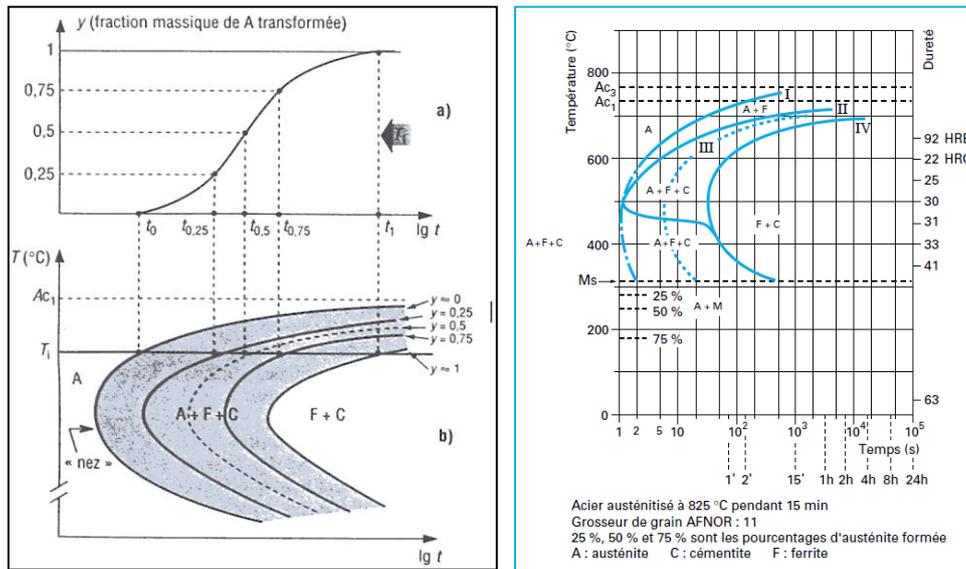


Fig. 4. Transformations isothermes des aciers : a) aspect schématique d'un diagramme TTT ; b) diagramme TTT d'un acier hypoeutectoïde du type C55 (0.53%C – 0.7%Mn – 0.24%Ni – 0.52%Cu)

Tant que $T_i > M_s$: cette cinétique est germinée par :

- la tendance $\delta(CFC) \rightarrow \alpha(CC)$ d'autant plus grande qu'on s'éloigne de A1.
- La tendance à la formation corrélative de carbure d'autant plus difficile que T_i est plus bas (diminution des vitesses de diffusion du carbone).

Cette cinétique est plus ou moins complexe et, dans le cas le plus simple (domaine perlitique) peut être décrit par une loi de type :

$\gamma = 1 - e^{-(kt)^n}$; avec γ : fonction d'austénite transformer $0 < \gamma < 1$ K, n : coefficients expérimentaux. Dans cette transformation avec diffusion ($A \rightarrow F+C$), on a mis en évidence deux types distincts, correspondant à deux mécanismes différents de formation de l'agrégat ferrite + carbure (F+C).

- La transformation perlitique ($500 \text{ à } 550^\circ\text{C}$) $< T < A1$.
- La transformation bainitique $M_s < T < (500 \text{ à } 550^\circ\text{C})$.

2.1.1. La transformation perlitique

Elle intervient pour les températures élevées du domaine des transformations isothermes de l'austénite. L'agrégat "ferrite + carbure" formé est de type perlite lamellaire la phase ... Est le carbure. Les lamelles de perlite ont, au fur et à mesure que la température T s'abaisse, une épaisseur e de plus en plus finie. En outre, la perlite à une dureté d'autant plus élevée que sa température de formation est basse.

2.1.2. La transformation bainitique

Au fur et à mesure que T_i s'abaisse, la diffusion devient plus difficile et la transformation perlitique est progressivement remplacée par une nouvelle transformation, dite bainitique. La

bainite, comme la perlite, un agrégat hétérogène de ferrite et de carbure de fer mais il semble qu'elle se forme au contraire par germination et croissance d'une aiguille de ferrite, le carbure se formant dans les zones austénitiques voisines enrichies en C. En distingue deux principaux types :

La bainite supérieure (dans la zone supérieure du domaine bainitique en lattes (figure 6)). La présence inter lattes de carbures fragiles confère à ces constituants de mauvaises caractéristiques de résiliences

La bainite inférieure aciculaire : les carbures de fer ϵ précipitent à l'intérieur des aiguilles de ferrites sous forme de plaquettes très fines conduisant à un durcissement par précipitation. La bainite inférieure présente un excellent compromis entre la limite élastique et la résilience.

2.2. Transformation sans diffusion ou martensitique

Au-dessous d'une température repérée M_s (310 °C pour l'acier C 55 et 195 °C pour l'acier C 90 par exemple), la transformation de l'austénite ne provoque que de faibles déplacements des atomes de fer (inférieurs à une distance interatomique); de ce fait, on admet qu'elle se fait sans diffusion (ce qui explique l'absence d'influence du temps). Elle progresse seulement en fonction de l'abaissement de la température.

Cette transformation, dite martensitique, se produit à la faveur d'un **mouvement coopératif d'atomes de fer** qui, par groupes (ce qui conduit parfois à qualifier cette transformation de «militaire»), passent, par un mécanisme de cisaillement, de leurs positions dans le réseau de l'austénite à de nouvelles positions correspondant à une disposition plus stable à basse température.

L'évolution de la transformation pour les aciers hypo non alliés ou faiblement alliés est décrite par une relation empirique de la forme :

$$Y = 1 - \exp[-0.011(M_s - T_i)]$$

La valeur de M_s peut être déterminée à l'aide de la relation du type :

$M_s = 550 - 361\%C - 39\%Mn$: aciers non alliés.

$M_s = 561 - 474\%C - 33\%Mn - 17\%Cr - 17\%Ni - 21\%Mo$: aciers faiblement alliés.

Le point M_f désigne la température en dessous de laquelle il ne se forme plus de martensite. M_f ne peut être strictement déterminée et on considère souvent que $M_f \cong M_s - 215^\circ\text{C}$.

La martensite est obtenue par cisaillement complexe de réseau de l'austénite. Elle apparaît à l'échelle micrographique sous forme d'aiguille. La diffusion n'intervenant pas dans la transformation, la martensite a donc la même composition que l'austénite initiale. La martensite est saturée en carbone par rapport à une ferrite d'équilibre : Il s'agit d'une solution solide d'insertion de carbone dans un réseau quadratique centré (QC) de la ferrite.

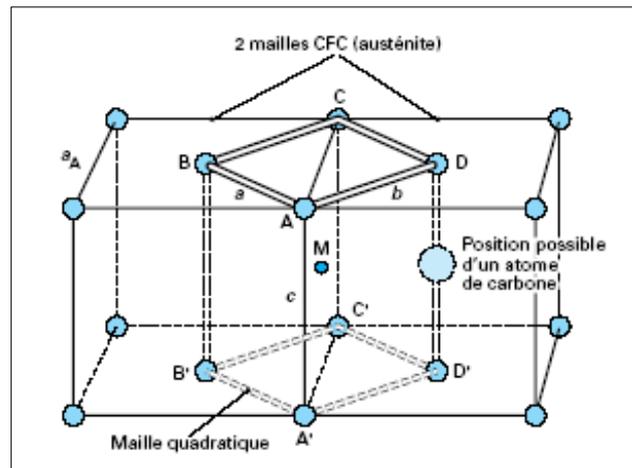


Fig. 5. Origine de la maille quadratique de la martensite selon Bain

La transformation de la martensite correspondant au d'une structure CFC à une structure voisine d'une CC, moins compact, la transformation se fait avec augmentation de volume. La martensite des aciers est très dure et très résistante mais extrêmement fragile la dureté de martensite des aciers est essentiellement due à la présence de carbone en insertion : cette dureté croit en même temps que le pourcentage en carbure (une martensite à 0.4%C à une dureté de l'ordre de 60 HRC (figure 10).

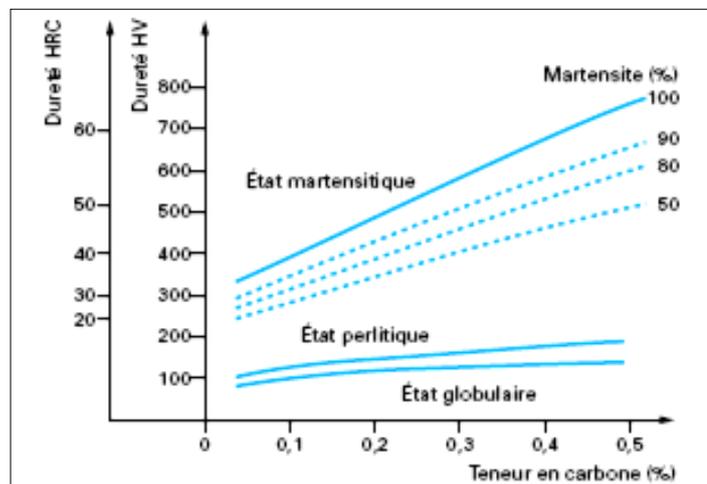


Fig. 6. Evolution de la dureté de la martensite en f(%C)

2.3. Les traitements isothermes (les courbes T.T.T)

2.3.1. Les diagrammes T.T.T en courbes iso austénitiques

Les lois de décomposition de l'austénite hors équilibre sont très importantes pour les traitements thermiques. Il est d'usage, pour représenter ces lois de refroidissement, d'utiliser des réseaux de courbes nommées courbes d'isostructures à transformations isothermes, notées T.T.T. ces derniers sont à tracer en portant en ordonnées la température et en abscisses les logarithmes du temps. Un diagramme T.T.T est les lieux des points correspondant à une composition γ % d'austénite transformée. On générale, on trace :

- la courbe correspondante au début de décomposition de l'austénite.
- la courbe correspondante à la fin de décomposition de l'austénite.
- la courbe correspondante à 50% de transformation (en pointillés).

En température décroissante :

- le domaine repéré A+F est le domaine ferritique.
- le domaine repéré A+F+C est le domaine perlitique.
- le domaine repéré A+F+c est le domaine bainitiques.
- le domaine repéré A+M est le domaine martensitique.

La lecture des diagrammes T.T.T se fait uniquement suivant une horizontale (isotherme). La vitesse de refroidissement entre la température d'austénitisation et la température de maintien isotherme est souvent considérée comme très rapide. On représente donc le refroidissement par une verticale sur le diagramme (il est évident que pour les pièces massives, le refroidissement n'est pas immédiat)

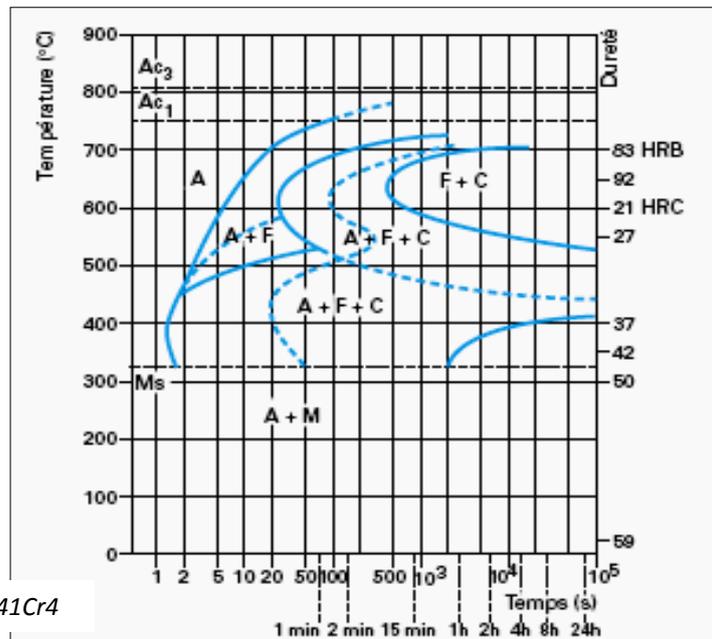


Fig. 7. Diagramme TTT de l'acier 41Cr4

Nuance	Composition chimique (%)								
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu
38 Cr 4	0,38	0,74	0,28	0,010	0,023	0,26	0,90	0,04	0,17
Acier austénitisé à 850 °C pendant 30 min Grosseur de grain AFNOR : 9 à 10									

2.3.2. Exercice d'application

On dispose dans de ce diagramme TTT d'un acier allié 38Cr4 et on vous demande de répondre aux questions suivantes :

- 1°) Donner la signification détaillée de cette désignation.
- 2°) Quels sont les paramètres d'austénitisation de cette nuance.
- 3°) Etude de transformation isotherme à $T_i = 500^\circ\text{C}$.
 - a°) Déterminer le temps d'incubation t_0 de début de transformation ferritique ;
 - b°) Déterminer l'instant t_1 de fin de transformation ferritique ;

- c°) A quel instant 50% d'austénite sera transformée ?
- d°) Quel est l'instant de début de transformation perlitique ?
- e°) Quelle est la durée totale de transformation ?
- f°) Quelle est la dureté résultante ?
- 4°) Les exigences industrielles d'une telle transformation imposent une durée de transformation égale à 45min, soit $3.33 \cdot 10^3$ secondes, à des températures $T_i \geq Ms$.
 - a°) Déterminer, à partir du diagramme, les températures correspondantes pour ces durées de transformation
 - b°) Quelles sont les structures résultantes pour chaque température
 - c°) Quelles sont les duretés correspondantes pour chaque transformation.

2.4. Les traitements thermiques isothermes industriels des aciers

Les trempes classiques sont caractérisés par un refroidissement rapide à la température ambiante, elle présente donc divers inconvénients résultant de ce que les divers régions du métal n'ont pas la même loi de refroidissement (pièces massives) et ne subissent pas la transformation en même temps; l'accroissement de volume qui accompagne la transformation martensitique à l'intérieur de la pièce se heurte à la résistance des couches externe déjà transformées. D'où apparition de tension interne. Les méthodes de trempe étagées évitent ces inconvénients.

2.4.1. La trempe étagée martensitique (Martniproing)

Imaginons qu'après austénitisation en trempe, la pièce à traiter est dans un bain à température T_i juste supérieur à M_s (figure 2.8 a.). Au cours de la durée d'incubation (le temps minimum au bout duquel l'austénite commence à se transformer) qui précède la transformation bainitiques, la pièce au temps d'atteindre l'équilibre est réalisé, de refroidir la pièce de façon à obtenir une transformation martensite sans que la transformation bainitiques ait commencée.

La pièce étant en équilibre de température, on obtient une martensitique sans contrainte. Le refroidissement de la pièce après le maintien peut s'effectuer à l'air calme, la température étant juste supérieur à M_s , on pénètre aussitôt dans le domaine martensitique ou le taux de transformation ne dépend que de la température atteinte et non de la vitesse de refroidissement.

2.4.2. La trempe étagée bainitique (Austenipening)

Si on donne au bien de trempe une température $T_2 > M_s$ et si l'on maintient la pièce le temps nécessaire à l'achèvement de la transformation bainitique ou partiellement si t_1 est élevé. Dans ce dernier cas, on obtiendra une structure B+M après retour à la température ambiante. Le traitement parfaitement isotherme réduit au minimum les déformations de trempe. En outre, la bainite inférieure a des caractéristiques de résistance et de ténacité au moins aussi bonnes que celles d'une martensite revenu. La suppression de revenu est

également intéressante pour les nuances présentant une haute fragilité de revenu et pour les pièces de faibles dimensions et de forme compliquées.

2.4.3. La trempe étagée perlitique en recuit isotherme

On peut effectuer le maintien isotherme dans le domaine de la perlite, laisser la transformation s'achever puis refroidir. La structure obtenue est perlitique, ses propriétés sont comparables à celles d'un acier trempé et revenu à haute température mais le traitement ainsi réaliser est plus rapide et par suite plus économique. Il faut noter également, que ce traitement conduit à des résiliences plus faibles, à dureté égale que le traitement de trempe est revenu usuels.

2.4.4. La trempe étagée austéniformage (Ausforming)

C'est un traitement thermomécanique qui consiste à une déformation intense (forgeage, laminage...) en phase austénitique avant transformation martensitique. Cela exige d'utiliser une nuance dont le diagramme présente des domaines perlitiques et bainitiques séparés par une zone de très grande stabilité de A permettant la réalisation de la déformation. Cet important écrouissage augmente considérablement la densité des dislocations de la phase austénitique conduisant en suite à une martensite beaucoup plus fine et à des caractéristiques améliorées après revenu. Le gain sur R_e et R_m peut être de 25 à 50%

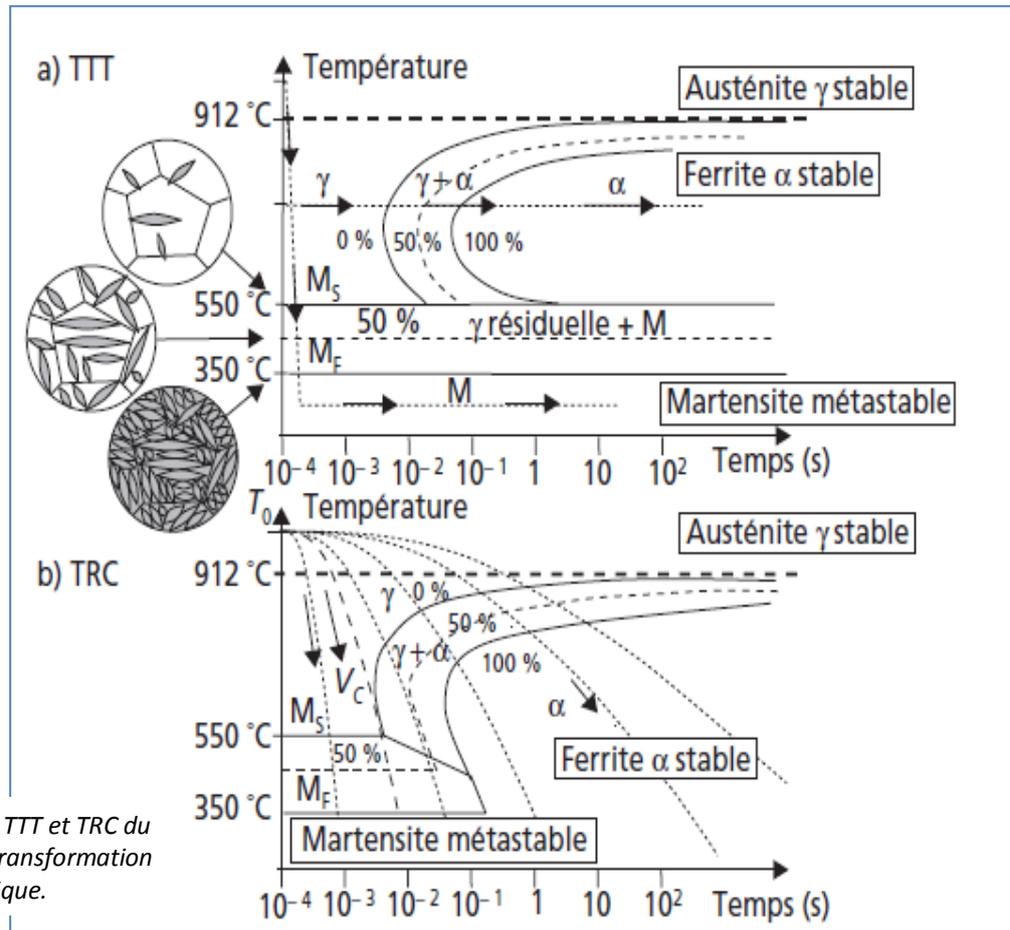


Fig. 8. Diagrammes TTT et TRC du fer pur, incluant la transformation martensitique.

3. Transformation anisothermes de l'austénite : Courbe TRC

Les courbes T.T.T étudiées la partie précédente ont été établies en conditions isothermes. En pratique, les traitements thermiques comportent très fréquemment un refroidissement continu depuis la température d'austénitisation jusqu'à la température ambiante (trempe à l'eau, à l'air ou à l'huile). Les débuts et de transformation obtenus en refroidissement continu, ne coïncide pas avec aux obtenus en condition isothermes (décalage vers le bas et vers la droite). Il parait donc utile, dans ces conditions, de prendre pour faire l'étude de la trempe de l'acier, non les courbes T.T.T établies en conditions isothermes. Mais les courbes T.R.C (trempe en refroidissement continu).

3.1. Mise en œuvre des diagrammes TRC

La connaissance des équilibres thermodynamiques et chimiques et la maîtrise des transformations de phases, diffusives ou displacives, débouche sur la possibilité d'obtenir à volonté une structure favorable à une utilisation visée grâce à des traitements thermiques.

La cinétique de la transformation γ en α se déroulant au cours d'un refroidissement continu est décrite par le diagramme de transformation en refroidissement continu, que l'on appelle diagramme TRC: autrement dit Transformation en Refroidissement Continu dont la fig. 9 donne une illustration typique relatif à un acier au carbone. Un tel diagramme TRC est tracé dans le système de coordonnées : logarithme du temps (en abscisse)-température (en ordonnée).

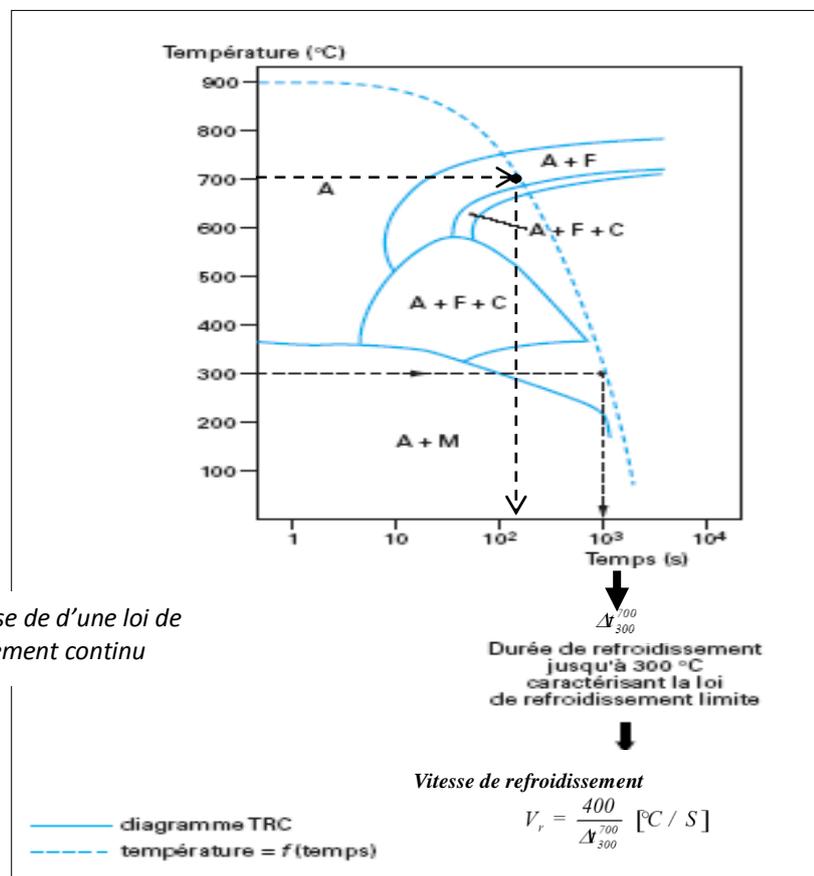


Fig. 9. Détermination de la vitesse de d'une loi de transformation en refroidissement continu

3.2. Exercice d'application

On dispose dans cette application du diagramme TRC de la nuance 45Mn5 et de l'évolution de la dureté en fonction de la teneur en carbone et de la structure résultant. L'objectif est donc de dégager l'intérêt de la mise en évidence d'une telle loi de refroidissement sur la structure et donc sur les caractéristiques obtenue après un tel traitement diffusive ou displacive (ou martensitique).

1. Donner la désignation détaillée de la nuance 45Mn5
2. Quels sont les paramètres d'austénitisation
3. Déterminer les vitesses de refroidissement des lois de refroidissement repérées 3, 6 et 9 (à compter à partir de l'extrême gauche)
4. Déduire pour chaque loi les structures, leurs fractions massiques et les duretés résultantes. Il convient de représenter la réponse dans un tableau.
5. Déterminer la vitesse critique permettant d'avoir une structure purement martensitique.
6. même question pour une structure exempte de la bainite
7. Quelle structure qu'on devra envisager par un traitement thermique si on impose pour une application industrielle donnée une dureté comprise entre 40 et 50 HRC allié à une teneur en carbone supérieure à 0.2%. (Fig. 11)
8. Pouvez-vous donc sélectionner la marge des vitesses de refroidissement correspondantes sur le diagramme TRC de la Fig. 10.

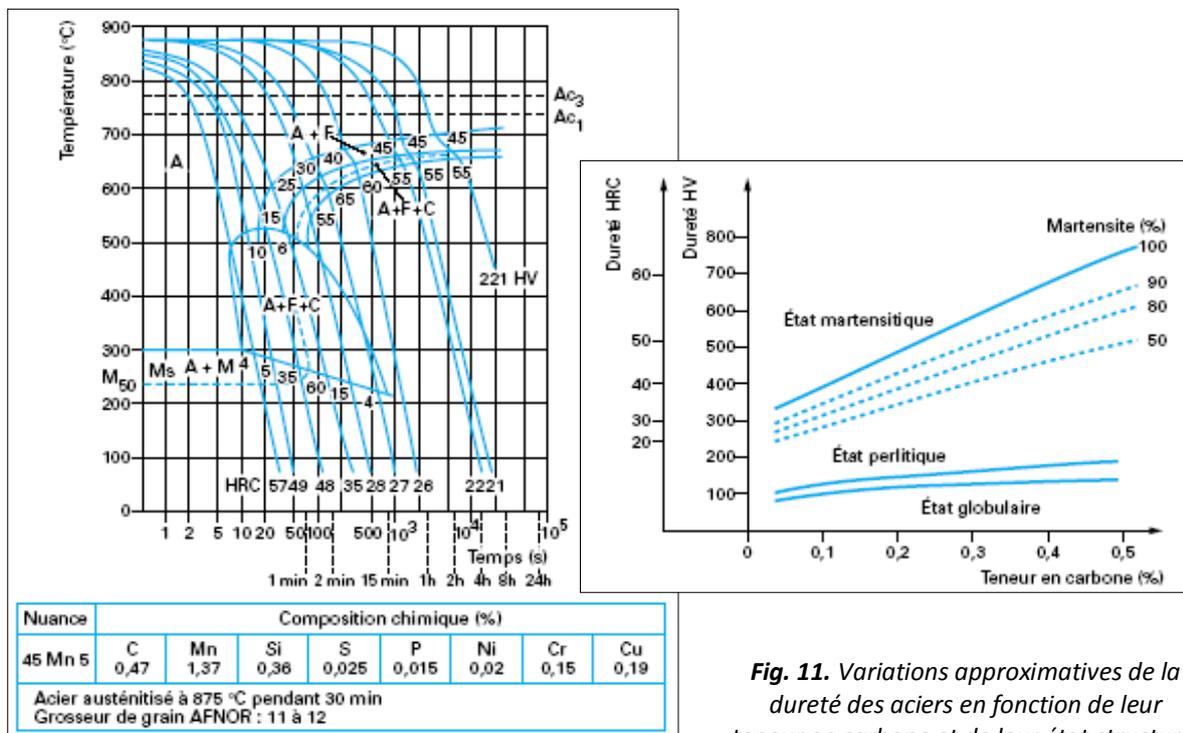


Fig. 11. Variations approximatives de la dureté des aciers en fonction de leur teneur en carbone et de leur état structural

Fig. 10. Diagramme TRC de la nuance 45 Mn5

3.3. Vitesse critique de trempe

Un acier est considéré comme trempé quand il acquit par refroidissement une structure à plus de 50% de martensite. La V_r qui donne une structure à 50% de martensite est dite vitesse critique de trempe (V_{CT}). La V_{CT} caractérise l'aptitude de l'acier à prendre la trempe, plus cette vitesse est faible, plus il est facile de tremper l'acier, et ce, en réduisant les risques de trempes.

La trempabilité de l'acier caractérise, en conséquence et par définition, les possibilités de réalisation de la structure martensitique, sans précipitation de carbone, par rapport aux conditions technologiques dans lesquelles peut être réalisée la trempe.

Exemple : Déterminer la vitesse critique de trempe pour l'acier 45Mn5.

4. Etude de la trempabilité à partir de l'essai JOMINY

4.1. Nécessité industrielle

Il est intéressant de noter que, lors de la mise au point de la trempe d'une pièce, si l'on peut se permettre de détruire une de ces pièces, il devient possible de déterminer quelles ont été les conditions de refroidissement en chaque point de celle-ci. En effet, il suffit alors, après avoir trempé cette dernière dans le milieu choisi, de la découper pour mesurer sa dureté aux points importants de son volume. Le report, sur la courbe Jominy de l'acier considéré (celle que le fournisseur remettra à la demande et non pas celle d'une autre coulée de la même nuance), des niveaux de dureté atteints permet de déterminer les distances Jominy équivalentes relatives à ces points et par voie de conséquence, d'estimer les valeurs du paramètre correspondantes.

4.2. L'essai JOMINY

L'essai consiste à chauffer une éprouvette donnée à une température et pendant une durée déterminée dans le domaine austénitique puis à la refroidir par arrosage à l'eau d'une extrémité. La mesure de la dureté le long d'une génératrice à partir de l'extrémité trempée à des distances normalisées : 1.5, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 30, 40, 50, 60 et 70mm (figure 2.12).

Un certain nombre de paramètres définis par la norme permettent de quantifier la trempabilité à partir d'une courbe Jominy : la pente au point d'inflexion est l'une d'entre eux. Il est à noter que l'illustration graphique d'un essai Jominy peut être présentée par l'évolution de la dureté en fonction de la distance ou bien en fonction de la durée de refroidissement Δt_{300}^{700} .

Les figures 2.13 et 2.14 représentent les courbes JOMINY de 3 aciers d'égale teneur en carbone, on peut définir un indice de trempabilité J fonction à la fois de la distance et de la dureté HRC et le dénominateur la distance correspondante en mm de la face trempée.

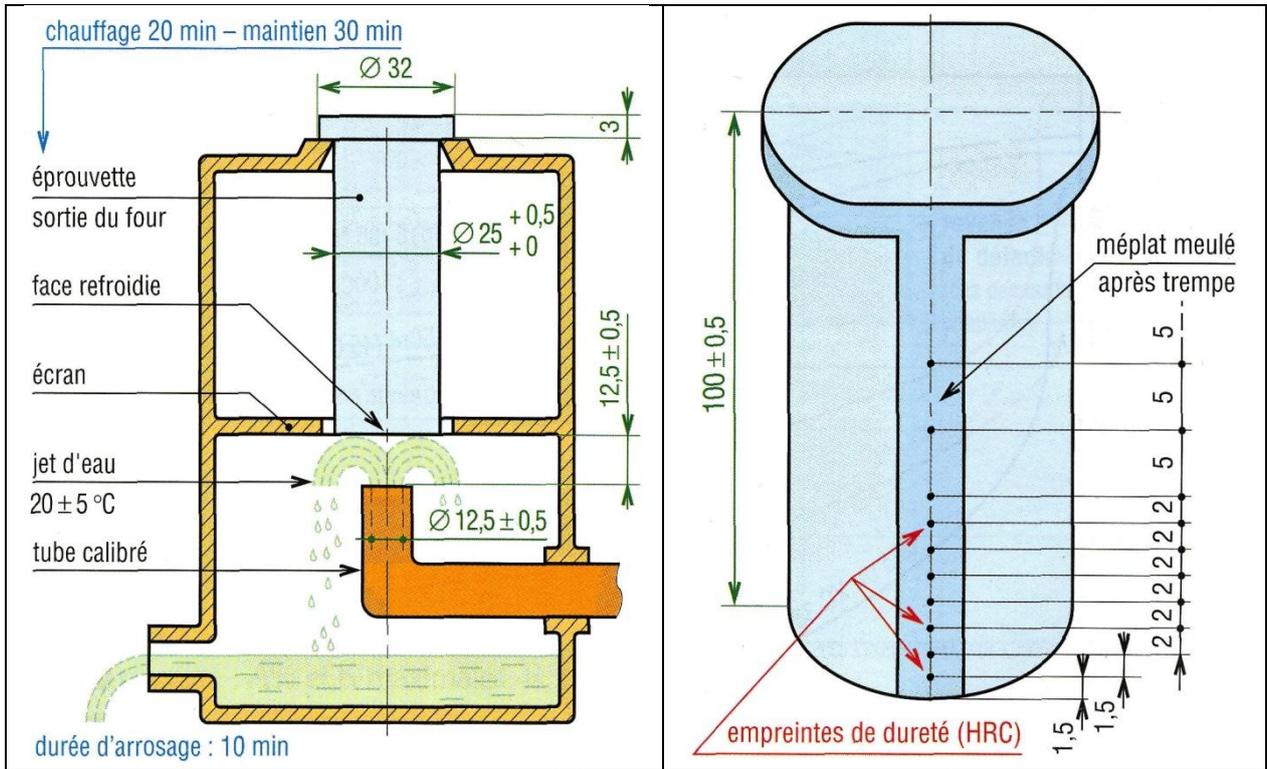
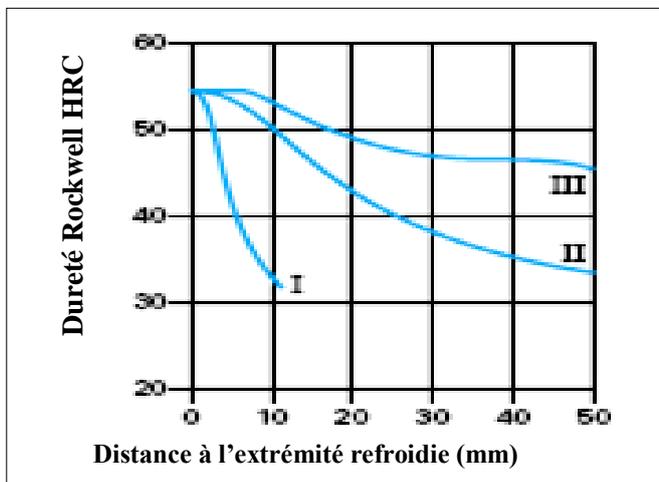


Fig. 12. Illustration schématique de l'essai JOMINY et mesure de la dureté à partir de la surface trempée



de carbone alliés au manganèse (I), au chrome-molybdène (II), au nickel-chrome-molybdène (III).

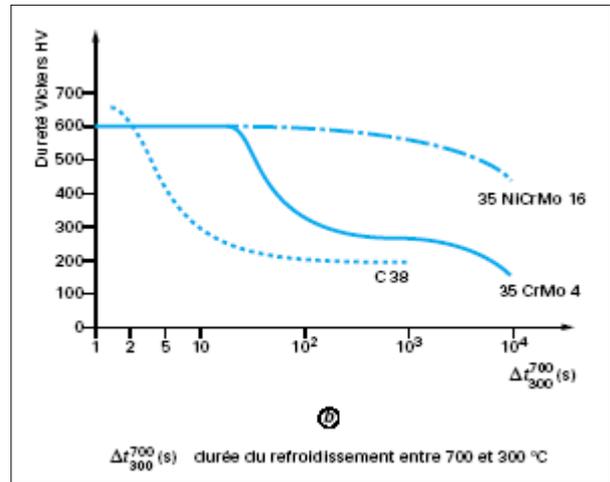


Fig. 14. Exemples de courbes $HV = f(\Delta t_{300}^{700})$ montrant l'influence de quelques éléments d'alliage

Application

- Décrire les deux figures tout en mettant l'accent sur l'influence des éléments d'addition
- Quelle est la nuance possédant la trempabilité la plus meilleure. Justifier la réponse
- Déterminer les durées critiques caractérisant la trempabilité les trois nuances (fig. 13)
- Même question pour les distances critiques associées (cas de la fig. 14)

5. Revenu après trempe des aciers

5.1. Intérêt industriel

Appliqué aux aciers au carbone alliés ou non alliés, après une trempe martensitique et/ou martensito-bainitique, le revenu a pour objet de provoquer une précipitation du carbone sous une forme et dans des conditions contrôlées afin de parvenir au **durcissement optimal**. Cette opération engendre une évolution structurale depuis l'état métastable obtenu après trempe vers un état plus proche de l'équilibre physico-chimique. Éventuellement, ce revenu peut provoquer la transformation de l'austénite résiduelle en bainite pendant le maintien ou en martensite secondaire au cours du refroidissement final.

5.2. Conditions d'exécution d'un revenu

- Les paramètres qui définissent les conditions d'exécution d'un revenu sont :
 - ✓ La température de revenu ou température maximale à laquelle est porté l'acier ;
 - ✓ La durée du maintien à la température maximale, c'est-à-dire le temps pendant lequel la température des zones martensitiques et/ ou martensito-bainitiques est maintenue constante et égale à la température de revenu ;
- La loi de refroidissement à laquelle la pièce est soumise à la fin du revenu.
- Pour apprécier ou prévoir le comportement au revenu d'un acier, on dispose des informations pratiques suivantes :
 - ✓ Courbes décrivant l'évolution des propriétés mécaniques de la martensite d'un acier en fonction de la température de revenu, et cela pour une durée de maintien donnée ;
 - ✓ Courbes décrivant, pour des ronds de divers diamètres trempés dans différentes conditions, l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu, et cela pour une durée de maintien donnée et pour des conditions déterminées de prélèvement des éprouvettes ;
 - ✓ Courbes Jominy tracées à l'état revenu. En fait, les divers phénomènes qui interviennent au cours du revenu des structures hors équilibre conduisent à regrouper les différentes conditions de revenu en grandes catégories que nous décrivons ci-après.

5.3. Les différents types de revenu

On distingue le revenu de détente, le revenu habituel (ou banal) et le revenu de durcissement secondaire.

☞ Le **revenu** dit de **détente** est généralement réalisé à une température comprise entre 180 et 220 °C ; il ne fait intervenir que le premier stade du revenu et n'est donc appliqué qu'à une structure totalement martensitique. Un tel revenu ne provoque qu'une faible réduction de la résistance à la traction et de la dureté ; par contre, il augmente très sensiblement la limite d'élasticité et améliore un peu le niveau des caractéristiques de ductilité.

☞ Il est donc réalisé lorsque les conditions d'emploi exigent la conservation des caractéristiques de résistance à leur niveau le plus élevé sans imposer de contrainte en ce qui concerne la ductilité.

☞ **Le revenu** que nous qualifions d'**habituel** ou de banal est réalisé à une température comprise entre 500 et 575 °C environ et provoque la précipitation complète du carbone sous forme de cémentite Fe_3C ou de cémentite M_3C substituée (M pouvant être à Cr, Mo... se substituant partiellement aux atomes de Fe). Ainsi donc, suivant la température de revenu, on provoque une diminution plus ou moins forte des caractéristiques de résistance mais aussi un relèvement très sensible des caractéristiques de ductilité.

☞ **Le revenu de durcissement secondaire** est réalisé à une température comprise entre 600 et 675 °C environ et provoque, dans les aciers contenant des éléments d'alliage carburigènes. La précipitation complète du carbone sous forme de carbures spéciaux comme Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, Mo_2C , V_4C_3 , etc. ou, parfois, de carbures spéciaux légèrement substitués (des atomes de fer se substituant partiellement aux atomes des éléments carburigènes).

5.4. Evolution des propriétés au cours de revenu

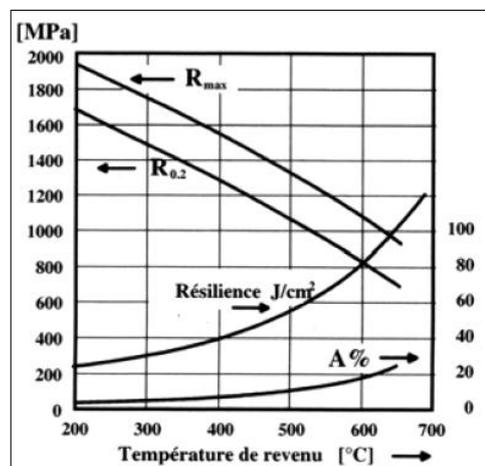
Les modifications structurelles décrites précédemment ont des conséquences importantes sur les propriétés mécaniques. La variété des structures obtenues expliquent que le revenu constitue un moyen efficace et très souple pour obtenir un ensemble des propriétés ajustées aux exigences de fonctionnement cependant, chacun des phénomènes aura des influences propres sur les caractéristiques et il faut envisager des interférences possibles pour expliquer finalement les variations des propriétés obtenues. Les principaux paramètres influençant le traitement de revenu sont :

- La composition chimique de l'acier : elle intervient pour fixer la composition après trempe et agit directement sur les transformations au cours de revenu.
- Les facteurs externes : températures de revenu T_R et durée de revenu t_R .

Exercice d'application

La figure suivante montre l'évolution de R_m , R_e , K_{cv} et $A\%$ d'un acier au Ni-Cr en fonction de température de revenu T_R pour $t_R = 2$ heures.

Fig. 15. Diagramme de revenu pour un acier de composition 0.34 C, 1.5 Cr, 0.2 Mo, 1.5 Ni.



Questions

1. Décrire l'influence de la température de revenu sur les caractéristiques de résistance et de déformabilité
2. Calculer le taux de réduction de la résistance à la traction si en passe d'un revenu à 300°C à un revenu à 600°C.
3. Choisir la marge des températures de revenu permettant d'avoir une résilience supérieure à 40 J/Cm² alliée à une résistance minimale à la traction supérieure à 1330MPa
4. Déduire, pour ce cas les marges de variation de (A en %) et de R_{0,2} (en Mpa)

5.5. Influence de la composition chimique

Les éléments alliés de façon générale retardent la chute de dureté en $f(T_R)$; par action directe sur la dureté de la ferrite et sur tout par augmentation de la résistance à la coalescence des courbes. En outre, les éléments carburigènes peuvent conduire à un durcissement secondaire par précipitation de carbures alliés.

La fig. 17. montre l'influence de la dureté de revenu, pour des températures de revenu T_R différentes et pour une même nuance d'acier. On vous demande de décrire la courbe d'influence de la température en fonction de la teneur en carbone. On développera dans le cours l'ensemble des questions associées qui seront à caractère descriptif puis en vue de choisir le traitement adéquat pour une application industrielle donnée.

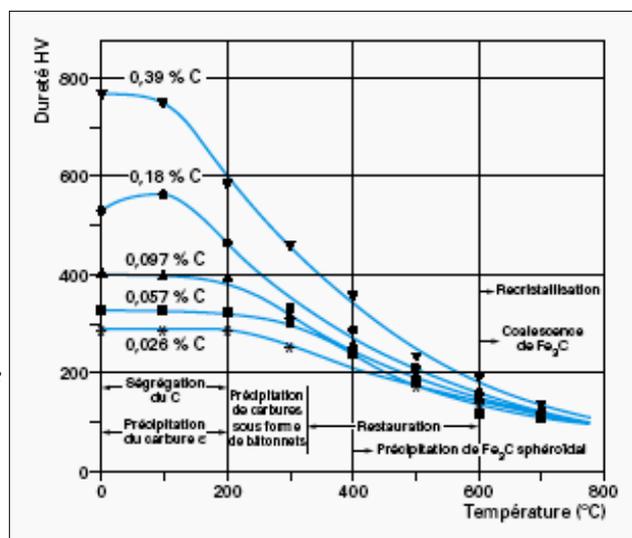


Fig. 16. Courbes d'adoucissement de la martensite des aciers non alliés en fonction de la température de revenu (d'après [18])

6. Traitements de recuit des aciers

6.3. Principes et but de recuit

Se sont généralement des traitements d'adoucissement ou de régénération. Nous décrivant dans ce paragraphe les traitements de recuit sans tenir compte de l'analyse en détail des transformations associées et des changements de la microstructure. Notons bien qu'on a présenté les cinétiques thermodynamiques associées à ces transformations métallurgiques dans les paragraphes précédents.

Les modes opératoires d'exécution des traitements de recuits sont semblables à ceux des traitements de trempe ou de revenu par exemple, c'est-à-dire un chauffage à une température de traitement appropriée, maintien et refroidissement. Les traitements de recuit ont pour but d'adoucir les aciers en éliminant les effets des étapes antérieures de leur fabrication (écrouissage ou trempe), ainsi que les hétérogénéités de structure imputables à leur élaboration (forgeage, laminage, soudage,...). Les recuits permettent en outre de retrouver les structures d'équilibre des aciers.

Selon le but visé est les modifications structurales obtenues, on distingue plusieurs types de recuits : le recuit de normalisation, le recuit complet, le recuit de coalescence, le recuit de recristallisation et le recuit de détente. Les principales fonctions remplies par un tel traitement de recuit peuvent être classées comme suit :

- i. de mettre le métal dans un état adonci défini on de faire tendre vers cet état si la structure a été perturbée par des traitements antérieurs de provoquer la formation de structures favorables à l'usinage ou à la déformation à froid.
- ii. De provoquer la formation d'une structure déterminée en vue, par exemple, de réaliser un traitement thermique ultérieur.
- iii. D'éliminer ou réduire les contraintes internes à la pièce.
- iv. D'atténuer les hétérogénéités, de la composition chimique.

Ce traitement comporte dans l'ordre l'exécution des étapes suivantes :

- ☞ Un chauffage jusqu'à une température de recuit qui dépend du type de correction à apporter.
- ☞ Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- ☞ Un refroidissement à l'air calme ou suivant une loi programmée.

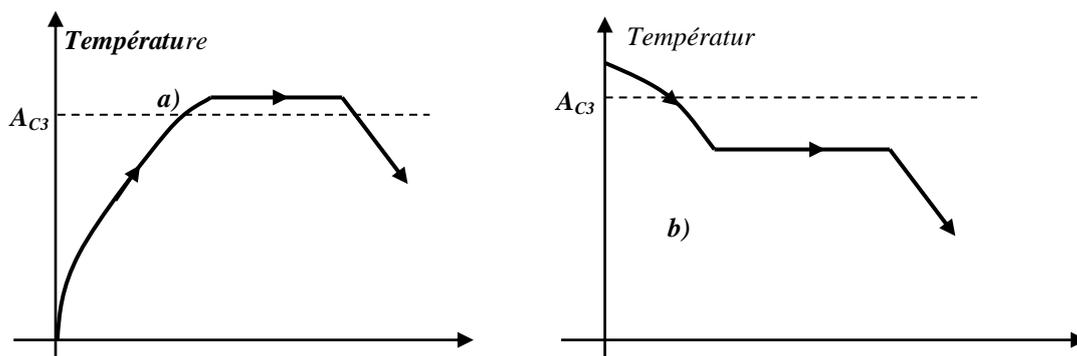


Fig. 17 : Représentation schématique d'un recuit : (a) classique ; (b) isotherme

6.4. Les différents types de recuits

Évolution vers l'état d'équilibre thermodynamique le plus stable (Ex. : recuit de détente, recuit de régénération, recuit de recristallisation, recuit de coalescence, recuit de détente, recuit de grossissement, recuit de grains d'homogénéisation...).

But :

- homogénéisation ou de diffusion
- normalisation ou régénération
- adoucissement
- détente ou stabilisation
- suppression de l'effet de l'érouissage

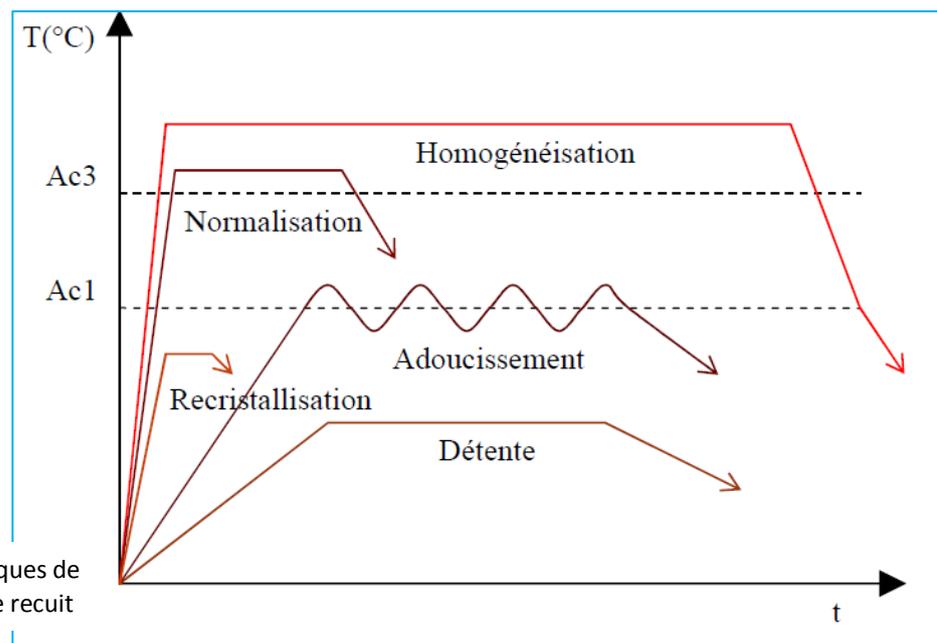


Fig. 18. Cycles schématiques de quelques traitements de recuit

a. Le recuit d'homogénéisation (ou de diffusion)

Les aciers bruts de coulée et les aciers montés présentent des phénomènes de ségrégation : le carbone et les éléments d'addition sont répartis de manière hétérogène à l'échelle de grain austénitique. Pour réduire cette hétérogénéité ou maintenir le métal à haute température dans le domaine δ et l'homogénéisation du métal s'effectue par diffusion des éléments ségrégés. La température du traitement d'homogénéisation est de l'ordre de $Ac3+200$ °C. Le maintien prolongé à haute température engendre un grossissement des grains, rend nécessaire de régénération ultérieure.

b. Le recuit de régénération (ou d'affinage structural)

Il permet de régénérer les structures sur chauffées (Zaf en soudage, aciers forgés, cœur des pièces cémentées...). Il comprend :

- Un chauffage sans maintien prolongé à une température légèrement supérieure à Ac_3 de façon à obtenir une austénite à grain fin.
- Un refroidissement et vitesse contrôlable à une structure ferrito-perlitique fine.

c. Le recuit de recristallisation

Le travail à froid ($T < T_R/2$) d'un métal par déformation plastique conduit à un écrouissage par modification de $A\%$ et K . une structure écrouie est caractérisée par une forte déformation orientée des grains. Un métal écroui devient fragile et il est souvent nécessaire de procéder à des recuits pour utiliser le métal ou pour pouvoir continuer à le déformer.

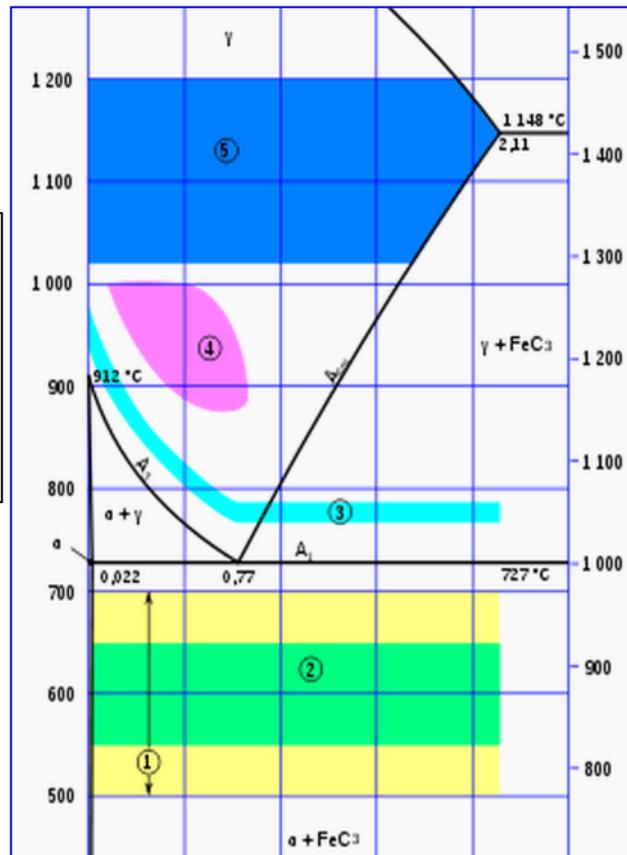
Caractéristiques d'un acier écroui

Etat	Rm (MPa)	HB	$K_{Cu} J/Cm^2$	A%
Recuit	600	160	160	30%
Ecroui à 10%	720	185	60	12%
Ecroui à 30%	215	40	40	8%
Ecroui à 70%	970	230	20	2%

Le cycle thermique du recuit de recristallisation comprend un chauffage à une température $500\text{ }^\circ\text{C} < T < 700\text{ }^\circ\text{C}$, un maintien prolongé à cette température et un refroidissement lent.

Fig. 19. Température de traitement thermique des aciers en fonction de la teneur en carbone

1. recuit de recristallisation ;
2. recuit de dimensionnement ;
3. température de trempe ;
4. recuit complet ;



7. Application de synthèse

Mise en situation

Les propriétés mécaniques des alliages industriels dépendent, en une grande mesure, de la microstructure des phases en présence ainsi que de leur distribution. La modification de la nature, de la microstructure et de la répartition de ces phases par un traitement isotherme ou anisotherme permet de répondre aux exigences économiques et technologiques de plus en plus imposées par l'industrie mécanique. Les traitements de revenu servent de complément pour les essais de trempe tout en permettant de "corriger" les états microstructuraux extrêmes résultant de ces derniers par amélioration des caractéristiques de déformabilité et de ténacité, au détriment de celles de la résistance.

L'application reporte sur les traitements thermiques de la nuance 35CrMo4, il se décompose en trois parties indépendantes.

TRANSFORMATION ISOTHERME

On dispose dans cette partie du diagramme TTT de la nuance 35CrMo4, et on vous demande :

1°) Donner la signification détaillée de la désignation donnée.

.....

2°) Quels sont les paramètres d'austénitisation de cet alliage.

.....

3°) Etude de la transformation isotherme à $T = 600^{\circ}\text{C}$.

a) Déterminer le temps (t_0) de début de transformation de la ferrite granulaire α_G ;

.....

b) Déterminer le temps (t_0') de début de transformation de la ferrite aciculaire α_W ;

.....

c) Déterminer le temps (t_0'') de début de transformation perlitique;

.....

d) Quelle est la durée totale de la transformation perlitique ;

.....

e) Quelle est la durée résultante de cette transformation.

.....

4°) Déterminer la marge de variation des instants t_0 du début de transformation de la ferrite aciculaire α_W .

.....

5°) Quelle est, pour ce cas, la marge de variation des températures correspondantes.

.....

.....

6°) Etude de la transformation isotherme à $T_i = 250^\circ\text{C}$.

a) Décrire brièvement la cinétique thermodynamique de la transformation à cette température ;

.....

b) Déterminer la fraction massique de l'austénite résiduelle sachant que :

$$Y_{Arés} = \exp [-0.011(Ms - T_i)]$$

.....

II. TRANSFORMATION ANISOTHERME

On dispose dans cette partie du diagramme TRC de la même nuance et on vous demande :

7°) Colorer, en couleurs différentes, sur la figure 2. de document réponse.

- Le lieu de points (M) des instants d'incubation des transformations ;
- Le lieu de points (N) de fin de transformation perlitique ;
- Le lieu de points (H) de fin de transformation bainitique ;

8°) Pour chacune des lois de refroidissement n°1, n°2 et n°3 indiquées sur le diagramme TRC de la nuance 34CrMo4 (figure2.), on vous demande de :

a°) Remplir le tableau 1. doc. réponse (effectuer les détails des calculs nécessaires).

Tableau 1 : Structures issues des lois de refroidissement n°1, n°2 et n°3.

	Δt_{300}^{700}	$V_r(\Delta t_{300}^{700})$	$Y_F(\%)$	$Y_P(\%)$	$Y_B(\%)$	$Y_{M+Ar}(\%)$	Dureté HRC
Loi n°3							
Loi n°4							
Loi n°5							

.....

b°) Quelle est l'influence de la vitesse de refroidissement sur les valeurs des duretés résultantes, expliquer pourquoi ?

.....

.....

.....

.....

.....

9°) Déterminer les vitesses critiques d'une trempe bainito-martensitique.

.....

.....

.....

.....

.....

III. TREMPABILITE ET REVENU

10°) Trempabilité de la nuance 35CrMo4.

a°) Déterminer la vitesse critique permettant de caractériser la trempabilité V_{rcm} de cette nuance d'acier ;

.....

.....

.....

b°) Quelle est la marge de variation de la dureté résultante ;

.....

.....

.....

11°) Deux essais de trempe ont été effectués sur les échantillons cylindriques de diamètre $\varnothing d = 20\text{mm}$, dans les deux milieux de refroidissement différents : l'eau et l'huile.

a°) Déterminer les deux vitesses de refroidissement sachant que :

- Eau : $\text{Log}(V_r) = -1,91.\text{Log}(d) + 8,08$.
- Huile : $\text{Log}(V_r) = -1,63.\text{Log}(d) + 7,32$.

.....

.....

.....

b°) Quelle est la (les) structure (s) obtenue (s) pour chaque milieu de refroidissement.

.....

.....

c•) Tracer et déterminer la distance critique de trempabilité (J_{xc}) en mm (doc. réponse figure 3.). Déduire la dureté correspondante.

12•) Revenu de la nuance 35CrMo4.

a•) Quand on peut utiliser ce type de traitement et quel est son rôle ?

.....
.....
.....

b•) En se référant à la figure3. déterminer les duretés en surface pour les différentes températures de revenu : 550, 600 et 650°C.

.....
.....
.....
.....
.....
.....

c•) Déterminer le taux de variation de la dureté en surface par rapport à l'état brut de trempe et ce pour les trois températures de revenu.

.....
.....
.....
.....
.....

13•) Choisir le type de traitement adéquat (trempe isotherme, trempe anisotherme sans revenu ou bien trempe anisotherme avec revenu) permettant d'avoir une structure martensitique à une dureté de 50HRC. Justifier votre choix.

.....
.....
.....
.....
.....

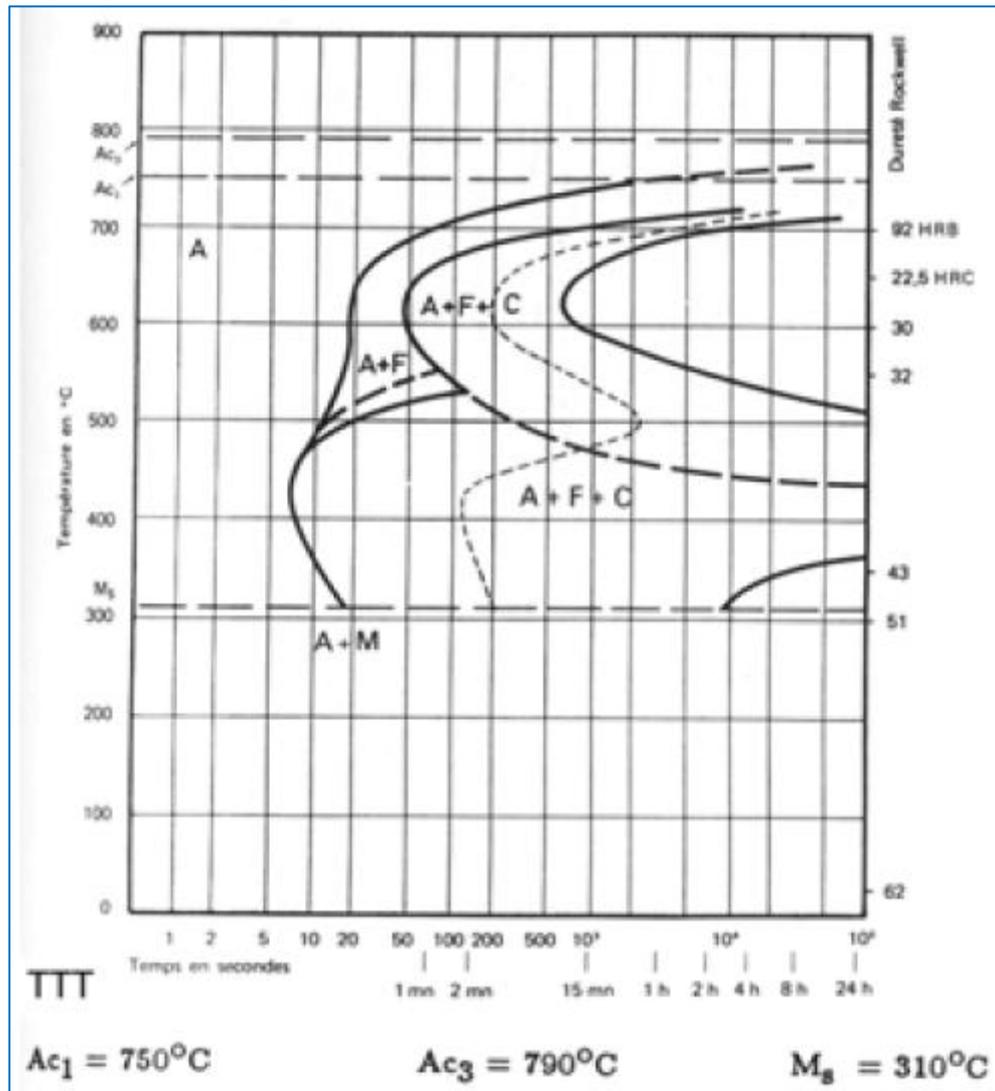
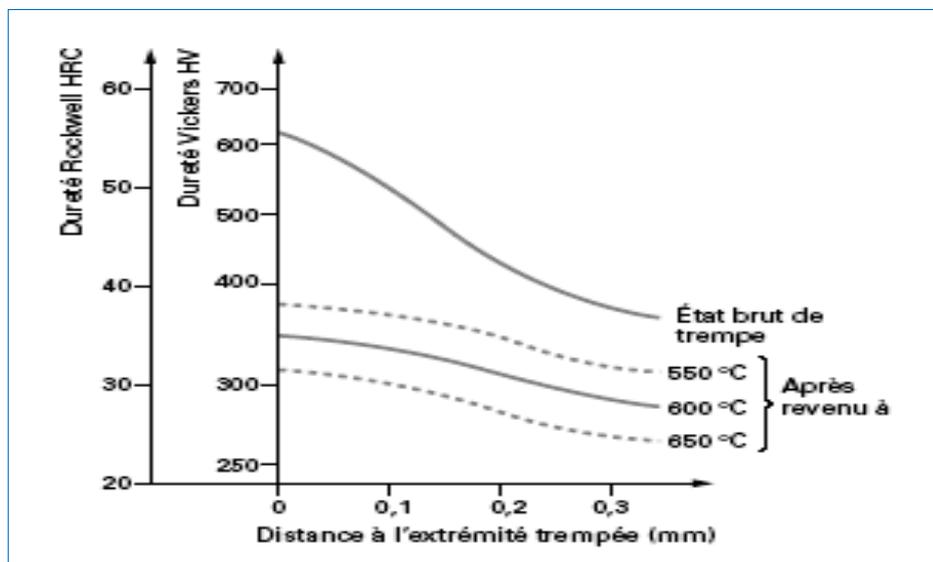
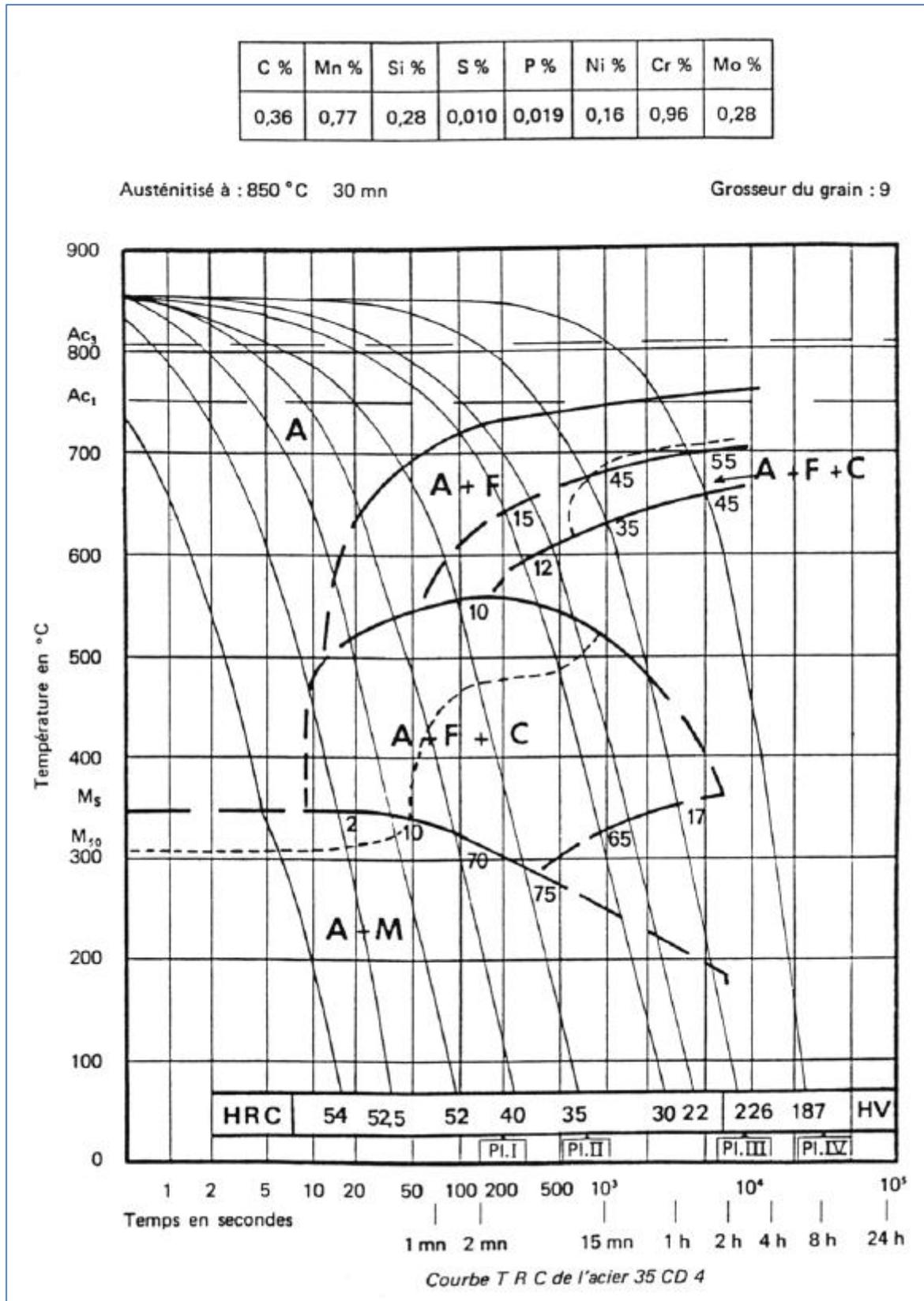


Diagramme TTT 35CrMo4



Courbes Jominy d'un acier type 35 CrMo 4



Diagrammes TRC de la nuance 35CrMo4