

Chapitre 7 :***Transformations isothermes des aciers***

- **Objectifs spécifiques :**
 - Maitriser les transformations isothermes
 - maitriser la lecture des courbes TTT et TRC

- **Pré-requis :**

Niveau BAC, notions élémentaires de chimie, diagramme Fer-Carbone, les traitements thermiques.

- **Eléments de contenus :**
 1. *les courbes TTT*
 2. *Trempe avec refroidissement continue(T.R.C)*
 3. *Comment Durcir Les Matériaux Métalliques Sans Les Fragiliser*
 4. *Courbes TRC*
 5. *Exemple D'analyse de la courbe TRC*
 6. *applications et TD*

CHAPITRE 7

TRANSFORMATIONS ISOTHERMES DES ACIERS**I- Les courbes TTT****I-1 introduction :**

Nous avons pu d'après le diagramme d'équilibre fer-carbone suivre l'évolution de la structure de différents aciers au carbone avec la température, la vitesse de refroidissement étant très lente ; la transformation eutectoïde (transformation perlitique) est la plus importante. Cette transformation peut avoir lieu dans d'autres conditions notamment par maintien de l'acier à température constante pendant des durées plus ou moins longues. Cette température sera inférieure à la température de l'eutectoïde (727°C). Le traitement correspondant consistera à rendre l'acier austénitique par un maintien dans le domaine, puis de le porter rapidement dans un bain à température constante. L'acier est alors maintenu pendant des durées différentes à différentes taux d'austénite transformée. Tous les résultats sont reportés sur un diagramme température/ $\log_{10}t$ (température de transformation, temps, domaine de chaque phase). Les courbes TTT les plus simples se présentent en général comme représenté

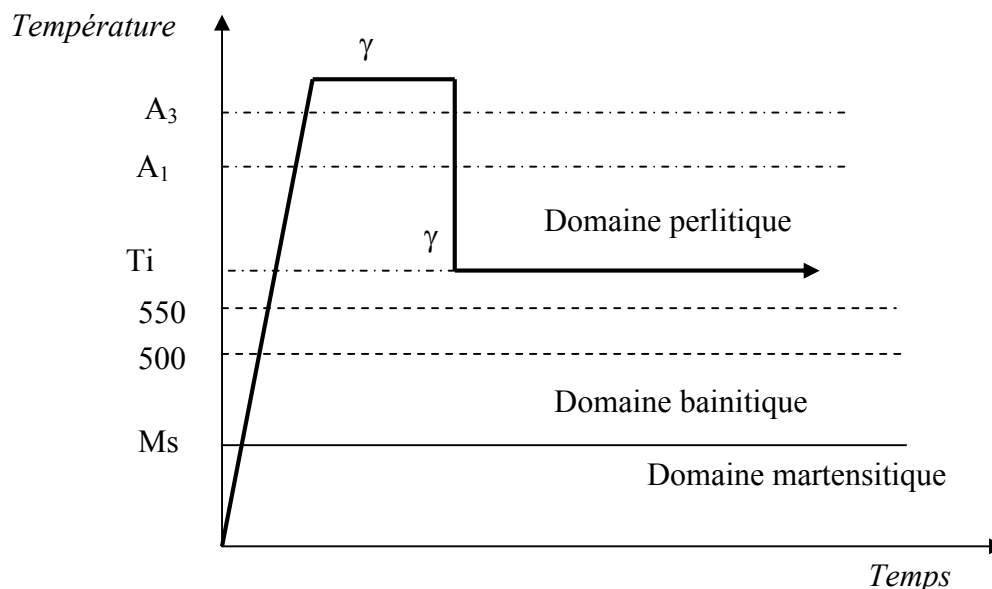


Figure VII.1 : Différents types de transformation.

I-2. Les Différents Types De Transformation Isothermes De L'austénite:

On distingue deux classes de transformation de l'austénite en condition isotherme : avec ou sans diffusion.

I-2.1. Transformation avec diffusion :

Lorsque la température de maintien T_i est comprise entre celle du point A_1 et celle du point M_s (Martensite Start : température de début de transformation de l'austénite), les transformations de l'austénite conduisent à la formation d'agrégats de ferrite et de carbures :



mettant donc 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 A débute après un certain temps d'incubation t_0 et est déterminée 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.

En faisant varier T_i , on détermine :

- ❖ $t_0(T_i)$: début de transformation de A ($y = 0$).
 - ❖ $t_1(T_i)$: fin de transformation de A ($y = 1$).
 - ❖ $t_y(T_i)$: fraction massique de A transformée.
- la transformation perlitique : $(500 \text{ à } 550 \text{ } ^\circ\text{C}) < T_i < A_1$
 - la transformation bainitique : $M_s < T_i < (500 \text{ à } 550 \text{ } ^\circ\text{C})$

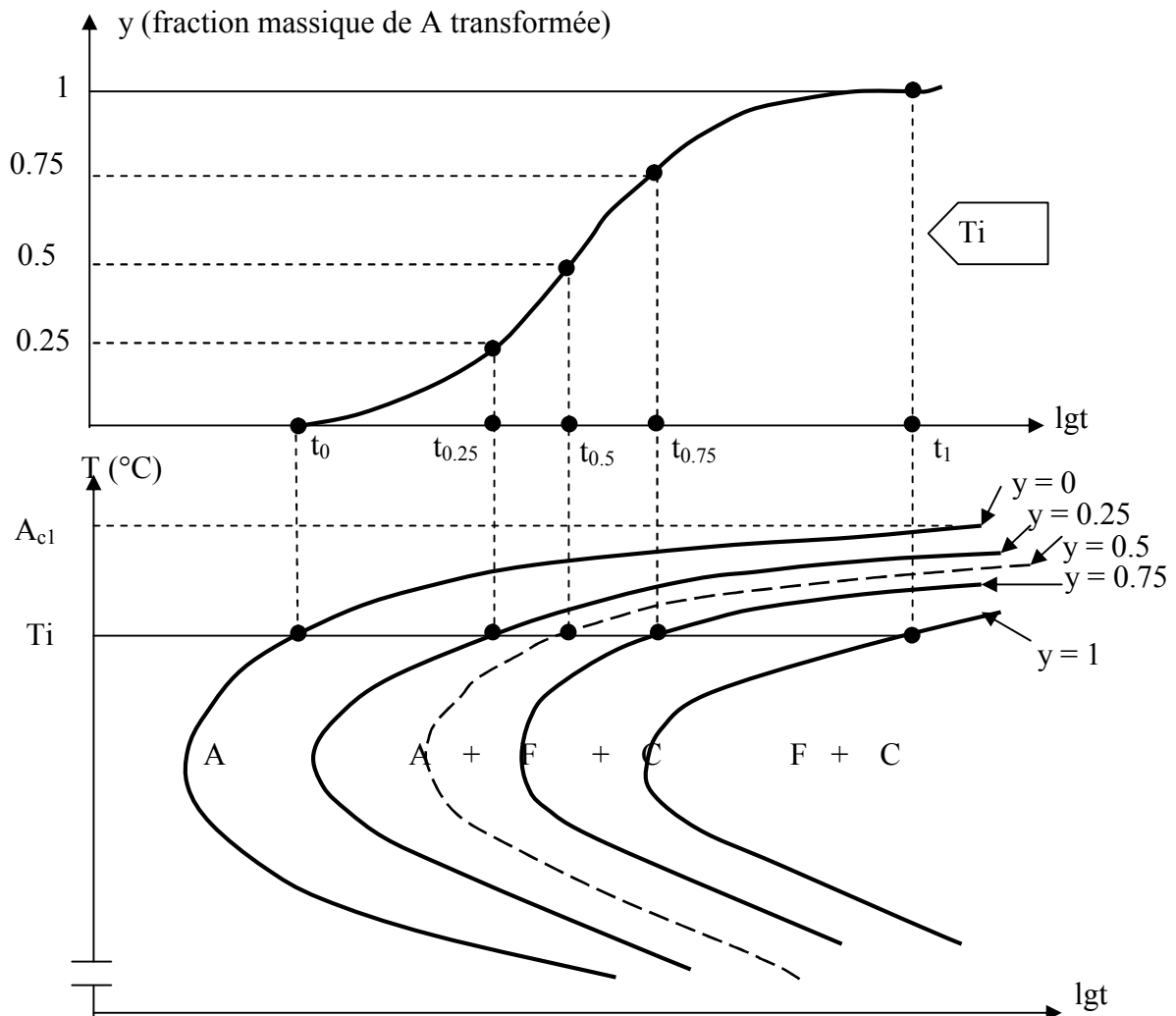


Figure VII.2 : Tracé schématique d'un diagramme TTT
(faisceaux d'isoausténitiques)

I-2.2. Transformation sans diffusion ou martensitique :

En dessous de M_s la diffusion du carbone devient très difficile et la transformation martensitique est une transformation sans diffusion. Elle est quasi-instantanée et à chaque température T_i , (Pour un refroidissement très rapide de T_a à $T_i < M_s$) une fraction déterminée d'austénite se transforme en martensite : un maintien isotherme ne modifie pas le taux d'avancement de la réaction. Les iso-austénitiques sont des parallèles à l'axe des temps

I-3. Lecture Des Diagrammes TTT OU Courbes Iso austénitiques :

*Les courbes TTT sont lues horizontalement de manière à suivre l'évolution de la transformation en fonction du temps.

* Les différentes phases de l'acier sont notées comme suite :

A : austénite

F : ferrite

C : cémentite

M : martensite

Quand il est noté (F+C), le composé correspondant peut être la perlite ou bainite. La bainite existe pour les basses températures et la perlite pour les températures plus élevées.

(1) : courbe de début de transformation

(2) : Transformation de 50% de l'austénite

(3) : courbe de fin de transformation

*Les courbes TTT sont limitées dans leur partie supérieure par la température de l'eutectoïde et dans leur partie inférieure par le point M_s

En dessous de ce point le maintien isotherme, d' aussi ,longue durée qu'il soit, ne fait pas évoluer la transformation martensitique puisque celle-ci est indépendante du temps et ne peut se poursuivre si $dT/dt=0$

*Exemple de suivre de la courbe TTT (figure 7), pour la température T_1 :

A t_i : la transformation débute par la formation de ferrite+ cémentite à partir de l'austénite.

Dans ce cas F+C est la perlite

A $t_{1/2}$: 50% de l'austénite s'est transformée en (F+C)

A t_f : la totalité de l'austénite s'est transformée en perlite

*la verticale limitant à droite le diagramme TTT indique la dureté de la structure finale après un maintien de 24h, les courbes TTT n'étant pas définie –en-général pour des durées de maintien plus élevées.

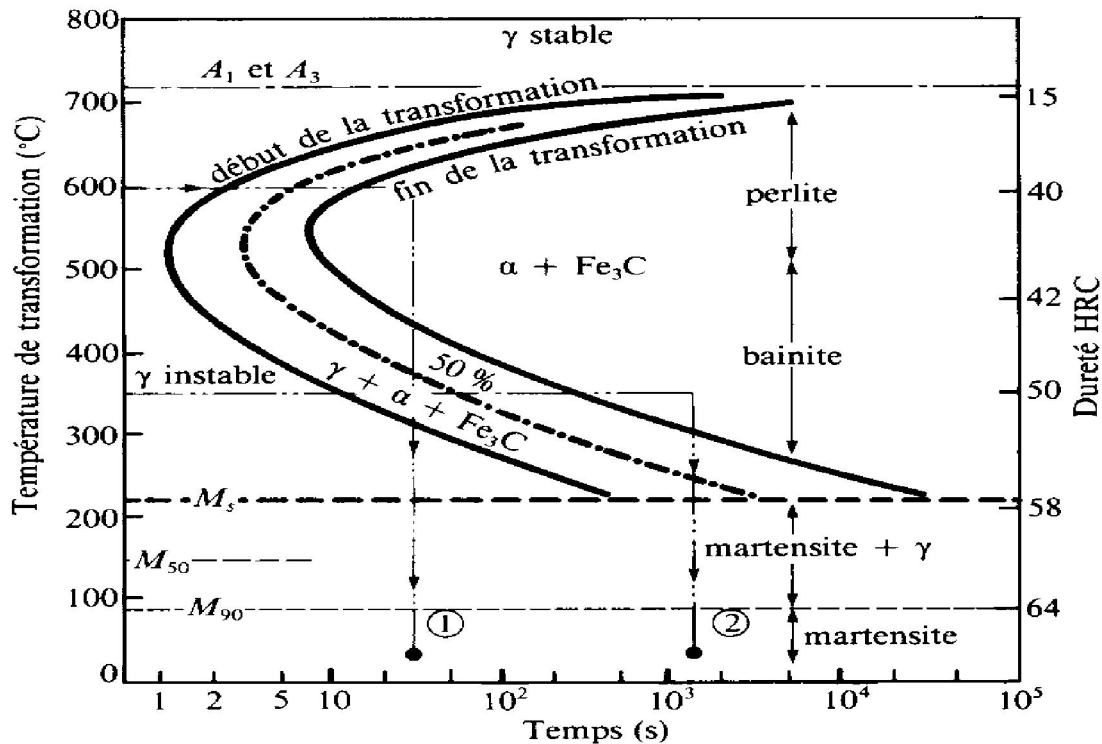
*Mécanisme des transformations isothermes : Aux températures élevées (proche de la température d'austénisation), la tendance à la transformation $A \rightarrow F+C$ est faible puisque le domaine de l'austénite est proche, en effet l'austénite est d'autant plus stable qu'on s'approche de son domaine d'existence.

Au fur et à mesure que la température de maintien isotherme diminue, la tendance à la transformation de l'austénite augmente, mais la diffusion devient plus difficile, la structure résultante est donc de moins en moins proche de l'équilibre. Pour une température suffisamment basse (M_s) la transformation se fait dès que le métal atteint cette température. Il n'ya pas de diffusion, le carbone reste emprisonné dans le réseau : la martensite est formée.

* **Remarques :**

1) Plus la température de maintien est basse et plus la perlite obtenue est fine.

2) le type de diagramme TTT présenté est le plus simple. On trouve dans certains diagrammes d'acier des domaines d'existence de la ferrite seule, ainsi qu'une différenciation nette entre les domaines de la perlite et de la bainite (figure VII.3)



FigureVII.3 : Diagrammes TTT d'aciers au carbone

I-4-les facteurs influençant la courbe TTT :

-la température d'austénisation : avant de procéder à la transformation isotherme, on part d'une structure à 100% austénitique ; à cet effet, l'acier est maintenu à une température supérieure à A_{c3} (température de début de transformation de l'austénite). Les conditions d'austénisation sont donc la température et le temps d'austénisation (T_a et t_a). Ces conditions doivent être spécifiées avant tout traitement isotherme car elles définissent l'état de l'acier avant ces traitements. En effet, un temps et une température d'austénisation plus élevés engendrent une austénite à plus gros grains, donc plus stable ; le domaine de l'austénite sera plus étendu et donc la courbe décalée vers la droite

-les éléments d'alliage : les éléments gammagènes (Mn, Ni, Cu, N et C) stabilisent l'austénite, leur action est donc de décaler la courbe vers la droite. Les éléments alfa-gènes (Cr, Mo, W, V, Ti, Nb) décalent la courbe vers la gauche et modifient sa forme car ils ont tendance à former des carbures qui retardent la transformation de l'austénite et favorisent certaines transformations plutôt que d'autres (la transformation bainitique, par exemple)

Il est possible de connaître à partir des courbes de transformation isothermes la stabilité d'un acier à l'état austénitique dans les différents domaines de température. Cependant les cycles thermiques que subissent généralement les pièces industrielles ne correspondent pas à des transformations isothermes. En effet, dans la majorité des cas les pièces subissent des traitements à refroidissement continu

42 Cr 4

%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu
0.44	0.80	0.31	0.013	0.03	0.46	0.96	0.05	0.18

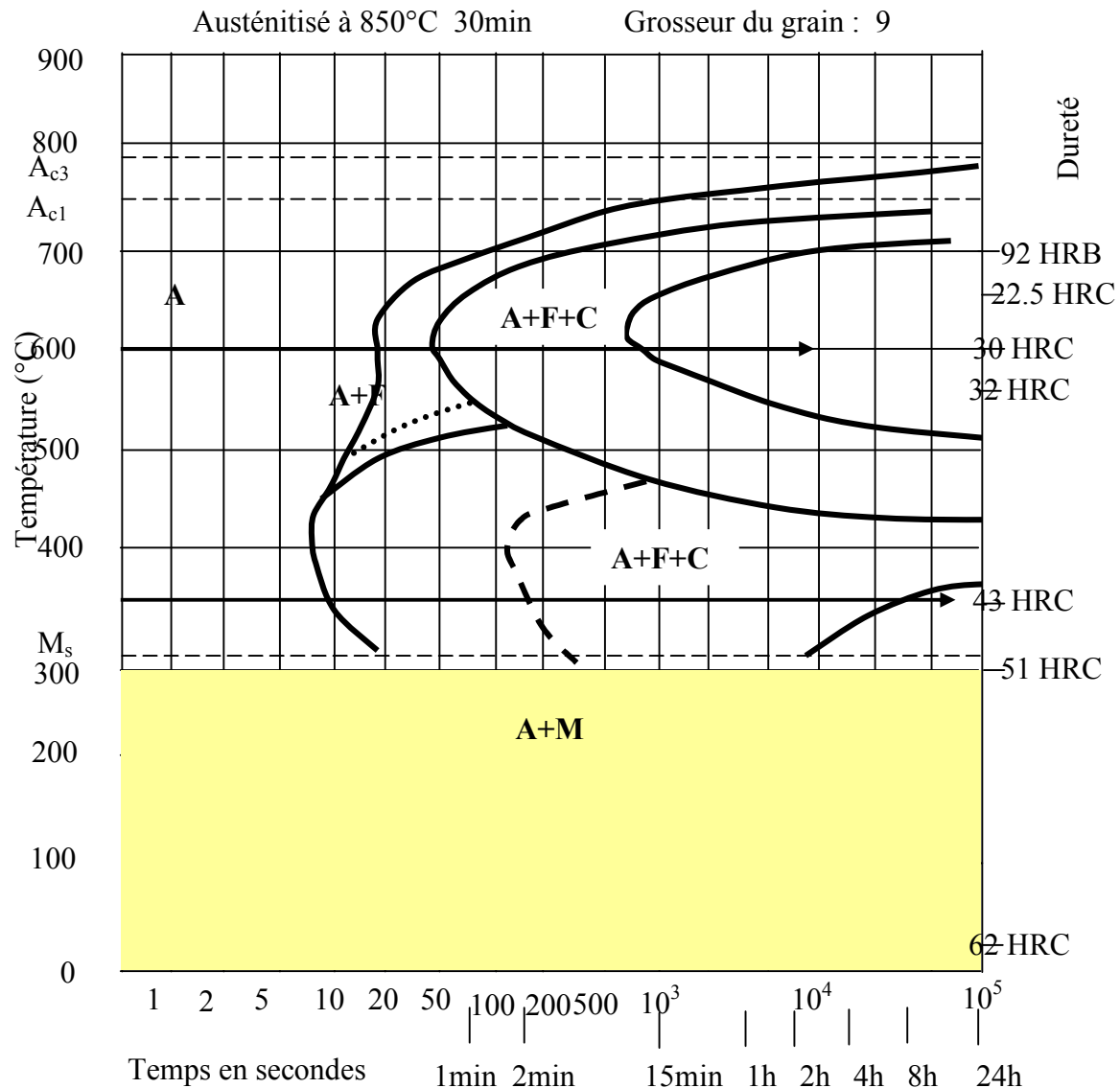


Figure VII.4 : Diagramme TTT de l'acier 42C4.

I-5. Les Traitements Thermiques Isothermes Industriels Des Aciers:

Les traitements classiques sont caractérisés par un refroidissement rapide à la température ambiante, elles présentent donc divers inconvénients résultant de ce que les diverses 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 conduira à la résistance des couches externes déjà transformées, d'où l'apparition de tensions internes et même de tapures. Les méthodes de trempes étagées évitent ces inconvénients.

I.5.1. La trempe étagée martensitique :

Imaginons qu'après austénitisation, on trempe la pièce à traiter dans un bain à température T_i juste supérieur à M_s (figure VII.5). Au cours de la durée d'incubation qui précède la transformation bainitique, la pièce a le temps d'atteindre l'équilibre de température (si la courbe TTT est suffisamment décalée vers la droite) et il est possible, lorsque cet équilibre est réalisé, de refroidir la pièce de façon à obtenir une transformation martensitique sans que la transformation bainitique ait commencé. La pièce étant en équilibre de température, on obtient une phase martensitique sans contrainte et le risque de tapures est pratiquement nul. Le refroidissement de la pièce après le maintien peut s'effectuer à l'air calme, la température étant juste supérieur à M_s et on pénètre dans le domaine martensitique où le taux de transformation ne dépend que de la température atteinte et non de la vitesse de refroidissement.

I.5.2. La trempe étagée bainitique :

Après austénitisation, la pièce est portée et maintenue à une température légèrement supérieure à M_s . Contrairement au cas de la trempe étagée martensitique, le maintien est suffisant pour que la transformation bainitique ait lieu totalement ou partiellement si t_1 est trop élevé. Dans ce dernier cas, on obtiendra une structure B+M (VII.6) après retour à l'ambiante. Le traitement parfaitement isotherme réduit au minimum les déformations de trempe en outre la bainite inférieure a des caractéristiques Re, K au moins aussi bonnes que celles d'une martensite revenue. La suppression du revenu est également intéressante pour les nuances présentant une haute fragilité de revenu et pour les pièces de faibles dimensions et de formes compliquées.

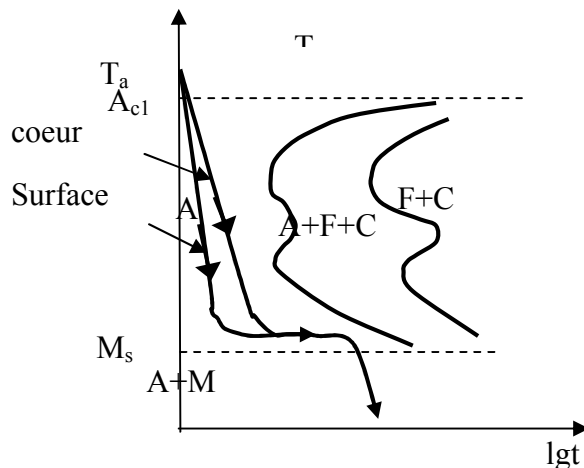


Figure VII.5 : Trempe étagée

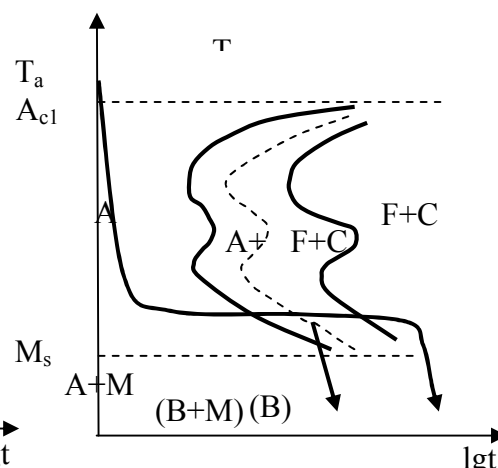


Figure VII.6 : Trempe étagée bainitique.

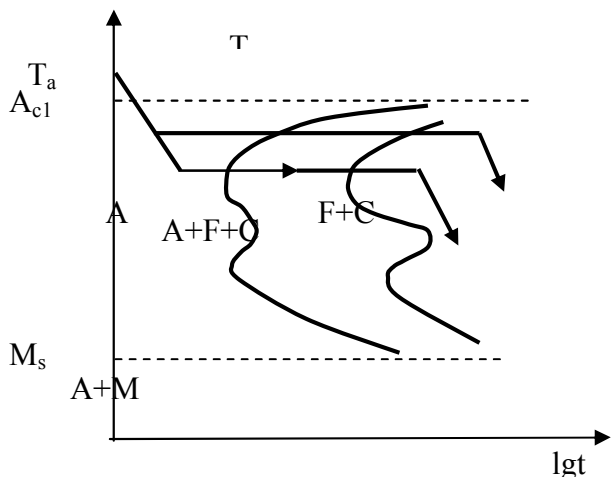


Figure VII.7 : Trempe étagée perlitique ou recuit isotherme

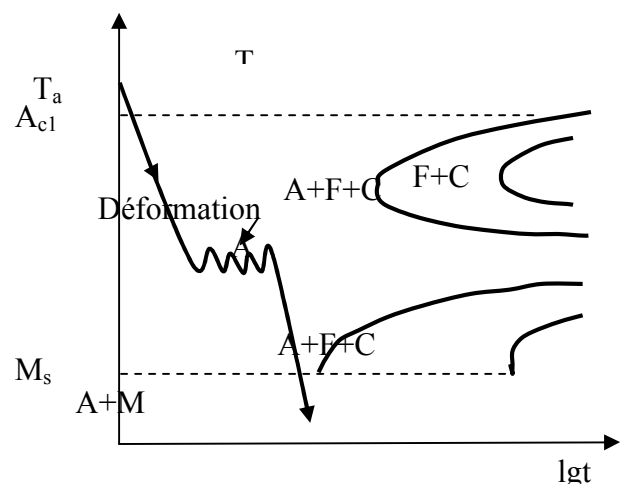


Figure VII.8 : Trempe étagée austéniformage.

I.5.3. La trempe étagée perlitique ou recuit isotherme :

On peut effectuer le maintien isotherme dans le domaine de la perlite, laisser la transformation s'achever puis refroidir (figure VII.7). La structure obtenue est perlitique, ses propriétés sont comparables à celles d'un acier trempé et revenu à haute température, mais le traitement ainsi réalisé est plus rapide et par suite plus économique. Signalons toutefois, que ce traitement conduit à des résiliences plus faibles, à une dureté égale, que le traitement de trempe et revenu usuels.

I.5.4. La trempe étagée austéniformage :

C'est un traitement thermomécanique qui consiste à une déformation intense (forgeage, laminage...) en phase austénitique avant transformation martensitique (figure VII.8). 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 ensuite à une martensite beaucoup plus fine et à des caractéristiques améliorées après revenu. Le gain sur Re et Rm peut être de 25 à 50 %.

I.6. APPLICATIONS :

I. Vous disposez du diagramme TTT d'un acier à 0.6%C (Figure VII.9).

1- Proposez deux méthodes de traitement thermique qui permettent d'obtenir à la fin un acier qui ait une dureté égale à **42 HRC**. Pour chacune des méthodes, précisez les différentes étapes (température, temps) du traitement thermique et donnez les constituants obtenus à la fin de chacune de ces méthodes.

2- Quels sont les constituants et leur proportion (en %), obtenus dans ce même acier à la fin du traitement Thermique qui comprend les étapes suivantes :

- Austénitisation à 850 °C
- Trempe à 620 °C et maintien à cette température pendant 5 s.
- Trempe à 380 °C et maintien à cette température pendant 45 s.
- Trempe finale à l'eau à 20 °C.

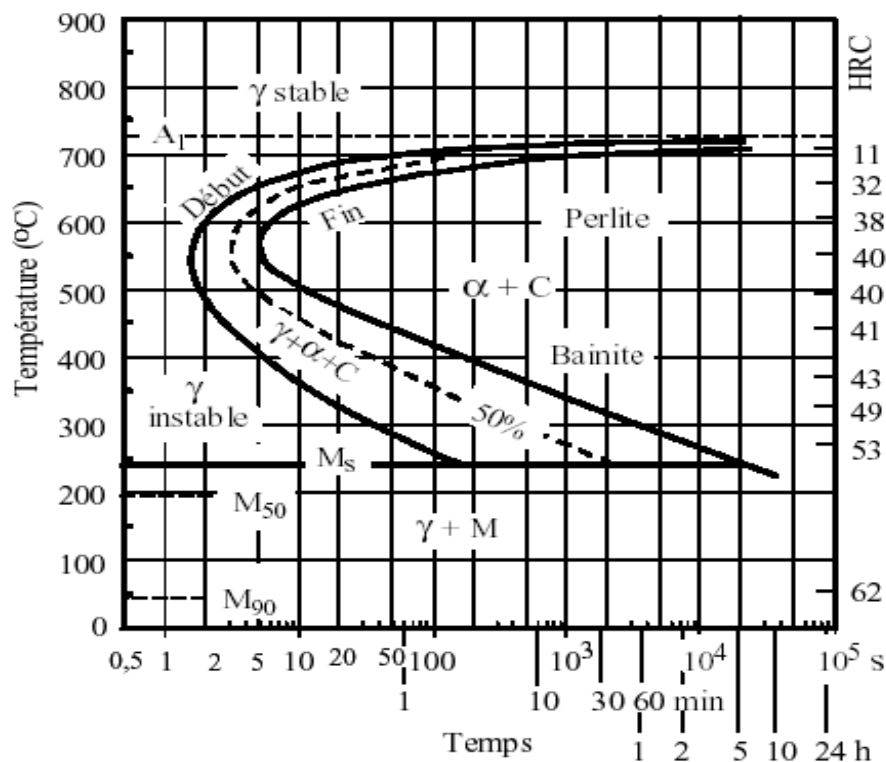


Figure VII.9: Diagramme TTT d'un acier au carbone 0.6%.

II. L'acier **30NiCr11** est un acier résistant aux sollicitations sévères et brusques (choc) aux basses températures. On désire étudier le traitement thermique de cet acier en conditions isothermes. Pour cette raison, on fournit le diagramme **TTT**.

- 1- Expliquer la désignation, quel est l'élément d'alliage majeur ?
- 2- Cet acier est austénitisé à **850°C** pendant **30mn**, il est ensuite refroidi jusqu'à **600°C** et maintenu à cette température :
 - a- Au bout de combien de temps commence la transformation de l'austénite ?
 - b- Quelle est la structure de l'acier à **600°C** au bout de **30mn** ?
 - c- Au bout de **20000** secondes, la pièce est retirée du four et refroidie à l'air. Quelle sera sa structure à la température ambiante ainsi que sa dureté ?
- 3- On désire conférer à cet acier une dureté meilleure, à cet effet, on effectue le maintien isotherme à une température plus basse. Proposer deux méthodes de traitement si on désire avoir une pièce de dureté égale à **39 HRC** ? Quelle sera la structure résultante pour chaque méthode ?
- 4- On désire avoir une structure qui contient **50%** de (perlite+ferrite) et **50%** de (martensite+ $A_{rés}$).
 - a- Proposer un traitement adéquat.
 - b- Déterminer la fraction massique de l'austénite résiduelle sachant que la température du bain de trempe est **20°C**. En déduire la fraction massique de la martensite.
 - c- Quelles sont les inconvénients de l'existence de l'austénite résiduelle dans la structure.Proposer un remède pour ce problème.
- 5- Déterminer la température du bain de trempe si on souhaite avoir une fraction massique en austénite inférieure à **0.5%**.

III. Soit l'acier **X38 CrMoV 5** dont on fournit le diagramme **TTT**.

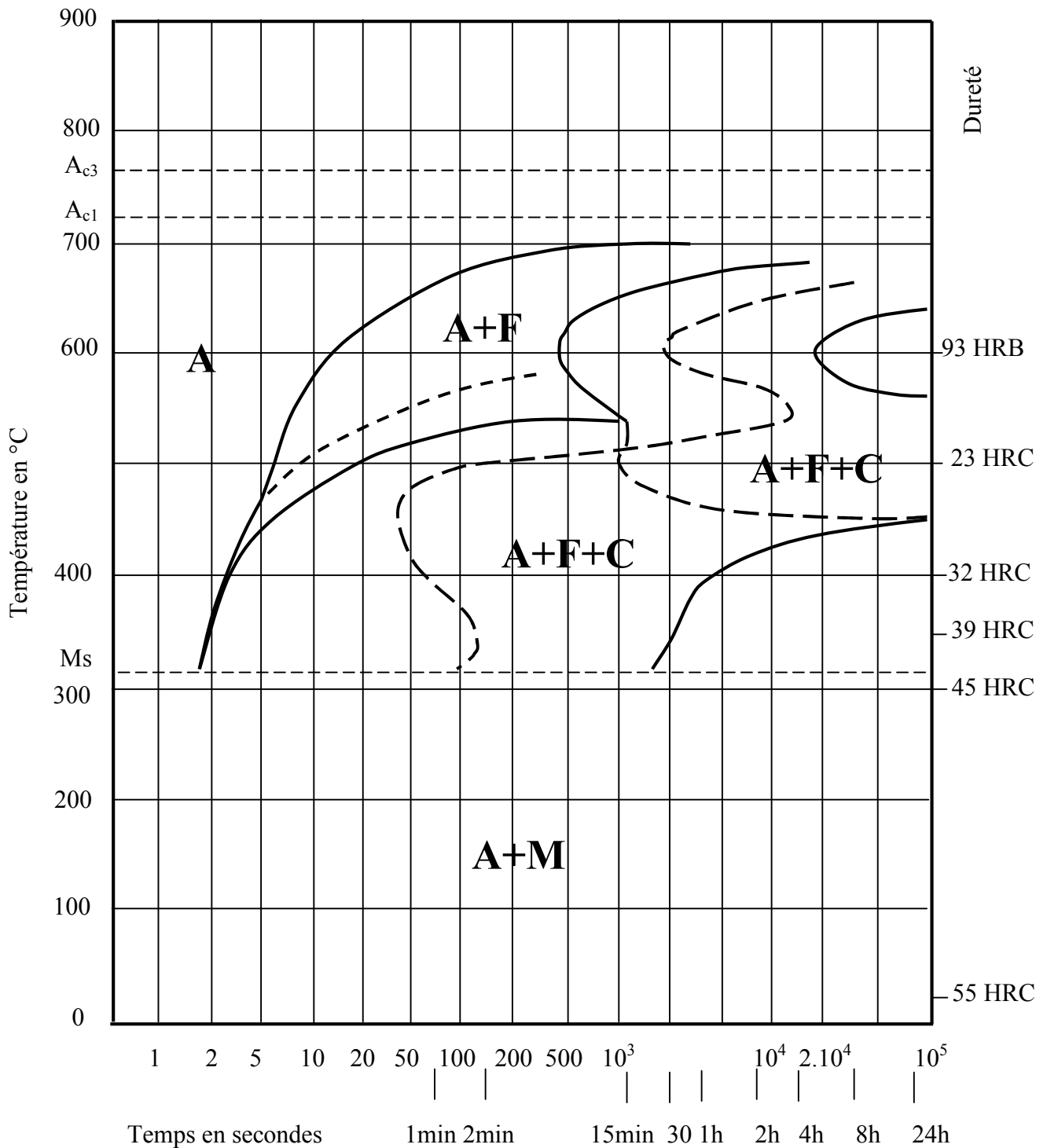
- 1- Expliquer la désignation de cet acier.
- 2- Donner les constituants de l'acier et leurs pourcentages à la fin du traitement suivant :
 - Austénitisation à 1000°C maintenue à 30mn,
 - Trempe à 755°C,
 - Maintien de 100 mn,
 - Trempe à 340°C,
 - Maintien de 4000 secondes,
 - Trempe lente à 20°C.
- 3- Déterminer une valeur approchée de la dureté de la structure résultante ($D_B=35HRC$).
 - 5- Afin d'augmenter R_e et R_m et d'éviter les risques de tapures de trempe, proposer un traitement thermomécanique isotherme adéquat.

30 NiCr 11

%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%V	%W
0.32	0.30	0.20	0.008	0.017	2.95	0.69	< 0.10	0.31	< 0.02	0.06

Austénitisé à 850 °C 30min

Grosseur du grain : 12



II- Trempe avec refroidissement continue (T.R.C)

T.R.C. : transformation au Refroidissement Continu

II-1- les courbes TRC

Elles permettent de déterminer pour différentes conditions de refroidissement, allant de refroidissement très rapides à des refroidissements très lents, la nature des constituants formés lors de ces refroidissements, les températures de transformation et la dureté de la structure à l'ambiance. Comme pour les transformations isothermes, l'alliage est préalablement austénite

Les courbes sont tracées suivant une échelle semi-logarithmique. Des courbes de refroidissement correspondant à des lois de refroidissement différentes sont tracées (figure 9). Le point d'origine de ces courbes sur l'axe des températures est la température d'austénisation

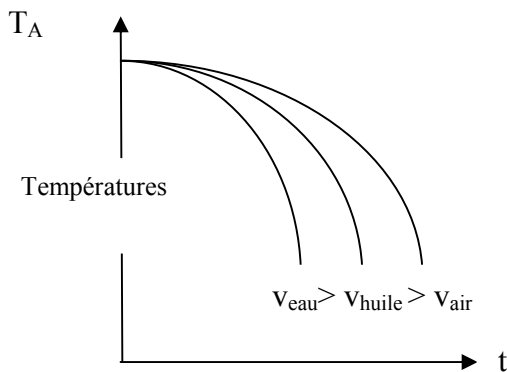


Figure VII.10 : Lois de refroidissement Correspondant à des milieux différents

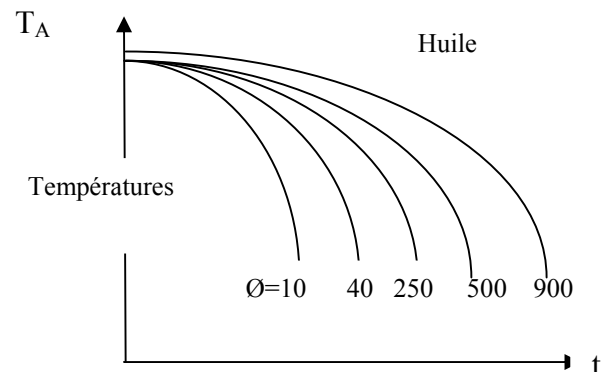


Figure VII.11 : Lois de refroidissement Correspondant à diamètres de pièces, dans un même milieu de refroidissement

On fournit généralement avec la courbe TRC des courbes de refroidissement sur transparents tracées dans le même système de coordonnées que les courbes TRC, et qui correspondent à des milieux de refroidissement précis pour des pièces de diamètres différents (figure 10)

plus le diamètre de la pièce est grand plus l'échange thermique entre le cœur de la pièce et le milieu est lent et donc la vitesse de refroidissement ressentie faible. Ces courbes sont tracées sur les transparents ou des calques afin de pouvoir les superposer aux courbes TRC. Ces courbes existent pour les milieux de refroidissements les plus usuels : l'air, l'huile et l'eau. Les différentes courbes de refroidissement vont traverser les domaines d'existence des différents phases, domaines qui auront un aspect et une forme différents suivant la nature de l'acier et les conditions d'austénisation. Nous représentons ci-suit un exemple de courbe TRC. Le domaine intermédiaire (bec de perroquet) est le domaine de la bainite qui n'existe pas pour les aciers au carbone à bas % en carbone.

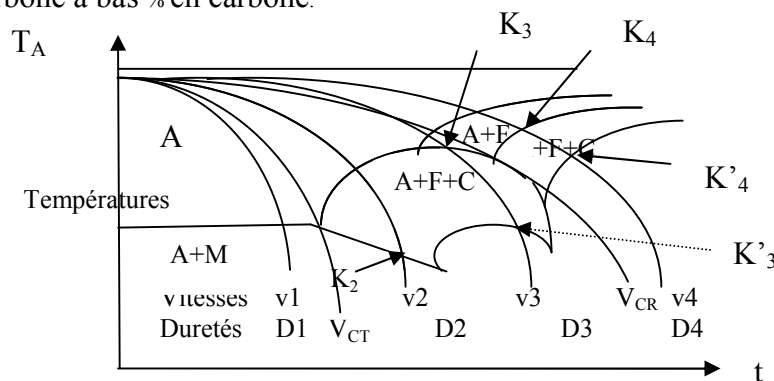


Figure VII.12 : Exemple de courbe TRC

II-2-Comment suivre une courbe TRC :

Il faut suivre la courbe correspondante à la vitesse de refroidissement adoptée

***VITESSE V_4** : on prend la courbe correspondante à cette vitesse et on voit à quel moment elle coupe le diagramme. AT_1 , on rentre dans le domaine A+F (transformation de l'austénite en ferrite). AT_2 , on rentre dans le domaine A+F+C (fin de transformation de l'austénite en ferrite et début de transformation de l'austénite restante en perlite). AT_3 , fin de transformation de l'austénite. La structure contiendra de la ferrite (K_4 %) et de la perlite (K_4 %), avec $K_4+K_4=100\%$. D_4 est la dureté de la structure à la suite de ce traitement.

* **VITESSE V_3** : on prend la courbe correspondante à cette vitesse et on voit à quel moment elle coupe le diagramme. AT'_1 , on rentre dans le domaine A+F (transformation de l'austénite en ferrite). AT'_2 , on rentre dans le domaine A+F+C (fin de transformation de l'austénite en ferrite et début de transformation de l'austénite restante en bainite). AT'_3 , fin de transformation de l'austénite en bainite. Entre T'_3 et T'_4 aucune transformation n'a lieu, et à T'_4 une partie de l'austénite se transforme en martensite. La structure contiendra de la ferrite (K_3 %) et de la bainite (K_3 %), de la martensite et de l'austénite résiduelle. D_3 est la dureté de la structure à la suite de ce traitement.

Remarque : Quand une courbe de refroidissement traverse le domaine de la bainite, on commence à avoir une structure hors d'équilibre. L'austénite n'est dans ce cas jamais transformée à 100 % ; il reste donc à la fin de la transformation de l'austénite qui est dite résiduelle.

***VITESSE V_2** : la courbe de refroidissement coupe le domaine de la bainite à T''_1 . A cette température débute la transformation bainitique qui s'arrête à T''_2 . A cette même température, l'austénite qui reste se transforme en partie en martensite, il restera donc de l'austénite à la température ambiante. La structure finale sera : bainite (K_2 %)+(martensite+ austénite résiduelle) ($100 - K_2$ %). La dureté de cette structure sera D_2 .

***VITESSE V_1** : La courbe ne coupe pas le domaine de la bainite, la seule transformation qui a lieu est la transformation martensitique qui débute à M_s . La structure finale contiendra : martensite + austénite résiduelle, sa dureté est D_3 . Si M_{50} est supérieur à la température ambiante, on aura dans la structure finale plus de 50 % de martensite. La quantité de martensite sera d'autant plus importante que v_1 est grande.

Vitesses de refroidissement :

Pour certaines exploitations, il est nécessaire de déterminer pour une loi de refroidissement la vitesse correspondante. Il est possible dans ce cas de calculer :

- Soit la vitesse de refroidissement instantanée à 700°C , ce sera la pente de la tangente à la courbe de refroidissement en ce point :

$$V_R = - (dT/dt)_{700}$$

- Soit la vitesse de refroidissement moyenne entre 700 et 300°C :

$$V_R = 400 / (t_{300} - t_{700})$$

II-3- Facteurs influençant la courbe TRC :

- 1- La température et le temps d'austénisation :

Plus ils sont élevés, plus l'austénite sera stable. La courbe sera décalée vers la droite et on aura à l'ambiante un taux plus élevé d'austénite résiduelle.

- 2- La composition chimique :

Les éléments gammagènes élargissent le domaine de l'austénite ils décalent donc la courbe vers la droite, de plus ils favorisent la transformation bainitique pour laquelle ils font

apparaître le domaine distinctement du domaine politique. Le seul élément qui décale les courbes TRC à gauche est le cobalt.

II.3. Recuit, Trempes et Revenus

A partir de la courbe TRC il nous est possible de définir les différents traitements thermiques ainsi que leurs buts.

Vitesse critique

Nous remarquons d'après cette courbe qu'il existe une vitesse limite au-delà de laquelle la structure obtenue est uniquement de la martensite (à gauche du diagramme), et une autre vitesse en deçà de laquelle la structure obtenue est une structure d'équilibre (à droite). Ces vitesses sont appelées respectivement vitesse critique de temps **martensitique** (V_{CT}) et vitesse critique de recuit (V_{CR}) (figure 12). Un acier est considéré comme trempé quand il acquiert 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} .

DIAMETRE CRITIQUE DE TREMPÉ – DURETE CRITIQUE :

Le diamètre critique de trempe D_{CT} est le diamètre pour lequel la structure est à cœur 50% martensitique. Pour ce diamètre et les diamètres inférieurs, la pièce est considérée comme trempée. A chaque mode de refroidissement (air, eau, huile) est associé un D_{CT} .

La dureté critique correspond à une structure 50% martensitique. La dureté critique est essentiellement fonction de la teneur en carbone.

III- Comment Durcir Les Matériaux Métalliques Sans Les Fragiliser

La question peut être formulée autrement : comment procéder pour obtenir une structure tenace ?

Ténacité est le mot clé pour toute application, c'est le terme qui désigne le meilleur compromis entre ductilité et résistance. Dans les méthodes de durcissement que nous venons de voir, la préoccupation majeure était de durcir. A trempe et l'écrouissage durcissent mais fragilisent aussi par l'introduction de contraintes internes de tension. Il existe des méthodes qui permettent de durcir sans fragiliser, nous les donnons dans ce qui suit.

III-1 -Durcissement Par Précipitation :

Nous avons déjà vu que des obstacles au mouvement des dislocations tels que joints de grains ou interfaces entre phases peuvent durcir un métal. Il est donc logique de penser que de petits précipités d'une phase intermédiaire peuvent avoir le même effet. Le traitement qui permet cette formation est dit précipitation.

Nous avons déjà vu ce phénomène lors de l'étude du diagramme Fe-C lorsque le θ^0 C est très faible (<0.25 0/0 : limite de solubilité maximale du C dans le fer α). Il était alors possible d'obtenir des précipités de Fe_3C dans une matrice de ferrite α .

Plusieurs types d'alliage peuvent présenter la même possibilité, le plus connu étant l'alliage Al-Cu (les cupro-aluminium). C'est ce phénomène qui a été à la base du développement des alliages d'aluminium dans l'industrie aéronautique. Les niveaux de résistance atteints pour ces alliages en les durcissant par précipitation a été tel qu'ils ont pu facilement substituer l'acier, leur avantage supplémentaire étant leur faible densité plus appropriée pour les structures aéronautiques que les alliages de fer.

Principe : Les systèmes A-B capables d'offrir un durcissement par précipitation sont ceux qui présentent un diagramme d'équilibre type Al-Cu, c'est-à-dire qu'ils doivent présenter une limite de solubilité maximale appréciable de l'un des éléments dans l'autre et qui de plus diminue considérablement en fonction de la température (figure VII.13).

Les alliages A-B dans un tel système susceptibles de durcir par précipitation sont ceux dont le % en B(X) est inférieur à la limite de solubilité de B dans A(X_0).

Le durcissement par précipitation n'est pas un résultat simple de l'opération de solidification comme tend à le faire croire la figure 13, mais un cycle de chauffage et refroidissement exécuté sur les pièces. On l'appelle cycle de "durcissement par précipitation" (précipitation hardening ou age hardening). Il consiste en un traitement de mise en solution, suivi du traitement de précipitation proprement dit.

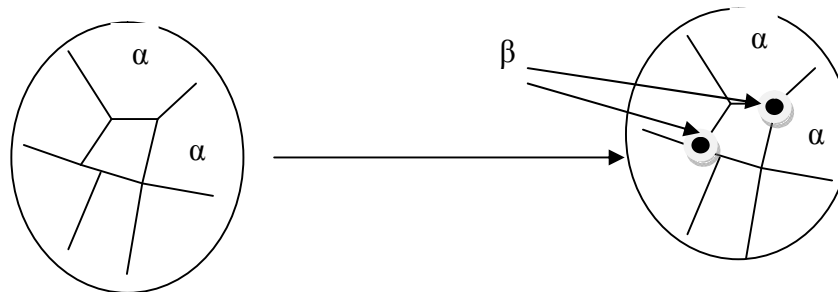


Figure VII.13 : Cycle de durcissement par précipitation : Les précipités de la phase β se forment aux joints de grains de α .

La première étape consiste à remettre en solution la précipitation originale de la solidification par maintien du matériau à une température T_0 dans le domaine monophasé de la solution solide primaire (α) puis refroidissement rapide jusqu'à la température ambiante qui fige cette structure (interdisant la précipitation) ; le produit sera sursaturé en élément B.

La deuxième étape est l'étape de la précipitation, elle consiste en un maintien à une température relativement basse, T_1 , dans le domaine biphasé. Les précipités formés sont beaucoup plus fins que les originaux et largement dispersés dans la structure favorisant l'ancrage des dislocations et par conséquent le phénomène de durcissement.

III-2 -Durcissement Par Trempe Etagée : (voir partie I-5)

III-3 -Durcissement Par traitement thermomécanique :

Il consiste à une déformation plastique à une température où existe la phase stable :

- a- Austénisation
- b- Refroidissement à T_{def}
- c- Déformation plastique (25 à 30% pour HT et 75 à 95% pour BT) à T_{def} (fragmentations des grains γ)
- d- Trempe à l'eau ou à l'huile (martensites fines)
- e- Revenu à basse t° (100 à 200°C)

Il améliore la ténacité.

IV – Courbes TRC

IV-1) Méthode de tracé d'un diagramme T.R.C.

- On détermine les températures Ac_1 et Ac_3 au dilatomètre différentiel avec une vitesse de chauffage bien déterminée.
- On effectue plusieurs essais dilatométriques dont un essai à refroidissement rapide avec (analyse thermique et magnétique) et un essai de refroidissement lent avec un dilatomètre différentiel.
- On reporte ces différentes courbes de refroidissement sur un diagramme température/logarithme de temps écoulé après la fin de la phase austénitisation.

- Les anomalies dilatométriques (dilatation due au changement de phase) enregistrées permettent de positionner les températures d'apparition des constituants formés le long de chaque courbe de refroidissement.
- Le pourcentage de l'austénite transformée dans chacun de domaine peut alors être déterminé graphiquement sur des enregistrements dilatométriques (selon des techniques et des hypothèses bien déterminées).
- Les points correspondant aux températures de début et de fin de transformations sont reportés sur les courbes de refroidissement, ainsi que les points correspondant à 50 0/0 d'austénite transformée. Ces points, joints entre eux, permettent d'établir la ligne en trait plein et la ligne en pointillé qui constituent le diagramme T.R.C.
- Une étude micrographique des éprouvettes nous permet de préciser la nature de constituants formés et les pourcentages d'austénite transformée, évalués sur les courbes dilatométriques.
- Une étude micrographique des éprouvettes nous permet de préciser la nature de constituants formés et les pourcentages d'austénite transformée, évalués sur les courbes dilatométriques.
- Des essais de dureté Vickers sous faible charge (10Kg) sont effectués avant attaque au nital des éprouvettes et les valeurs obtenues (exprimées en unités Rockwell C, ou Vckers pour les plus faibles) sont reportées sur le diagramme au bas des courbes de refroidissement correspondantes.

IV-2) Méthode d'exploitation des courbes T.R.C.

Pour tenir compte de l'importance des sections à tremper (diamètre, épaisseur) ainsi que le milieu de trempe (eau, huile, air...), des courbes ont été tracées sur papier transparent.

Disposant, pour une nuance d'acier, de sa courbe de transformation et d'une courbe de refroidissement à la même échelle sur transparent, on peut en les superposant, relever suivant le diamètre des pièces et la nature de refroidissement choisi les indications en % sur la nature des constituants et la dureté de la structure obtenue.

Le raisonnement est le même que celui utilisé en examen des structures. Si nous prenons le cas de l'acier 35 CD4 pour une pièce de diamètre 40 mm on trouverait :

- que la dureté obtenue dans le cas d'une trempe à l'eau est de 52.5HRC
- que la dureté obtenue dans le cas d'une trempe à l'huile n'est plus que 36 HRC.

IV-3) CONCLUSION

Les valeurs fournies par la superposition des courbes T.R.C. et les lois de refroidissement présentent un grand intérêt pour les bureaux d'études ou l'atelier de traitements thermiques, mais elles ne sont qu'approximatives car elles se réfèrent à un modèle qui peut par une légère variation de constitution ne pas fournir rigoureusement les mêmes courbes de refroidissement. D'autre part le retard du refroidissement à celui de la surface perturbe un peu les résultats.

Ces constatations ont conduit à utiliser un autre moyen complémentaire exprimant le comportement réel du métal à traiter, il s'agit alors de l'essai de trempabilité **JOMINY** qui sera traité ultérieurement.

V. EXEMPLE D'ANALYSE DE LA COURBE TRC :

Les symboles suivants désignent : A : austénite , C : cémentite , M : martensite ,
F+C : représente la perlite ou la bainite (selon le cas)

Remarques :

-La concentration en éléments d'alliage, la température d'austénisation et le temps de maintien figurent en tête

-Les duretés et les constituants obtenus sont fournies par les courbes de refroidissement

- Les courbes en pointillés représentent 50% d'austénite transformée

Considérons la courbe TRC de l'acier faiblement allié au chrome et molybdène désigné selon la norme AFNOR par 35CD4 (35CrMo4). La composition chimique exacte de cette nuance est inscrite sur le tableau de la figure (V.1).

- La courbe TRC est tracée également sur une abscisse à échelle logarithmique des temps.
- Les deux domaines (A+F+C) de haute température et de température intermédiaire marquent respectivement les domaines respectifs de perlite et de bainite.
- Le domaine (A+F) marque la décomposition de l'austénite en ferrite.
- Pour les fortes vitesses de refroidissement (V_1), l'austénite surfusionnée se transforme en martensite au passage de M_s .
- A des vitesses inférieures (V_2), l'acier traverse le domaine (A+F+C) qui est celui de la bainite. Il transforme ainsi une partie de son austénite en bainite et le reste en martensite au passage du point M_s .
- Lorsque les vitesses sont encore plus faibles (V_3 et V_4), l'austénite se décompose en partie au passage des hautes températures en ferrite, une autre partie en bainite et le reste en martensite.
- Pour les vitesses (V_5 , V_6 et V_7) une partie de l'austénite se décompose en ferrite en traversant le domaine (A+F+C) de haute température. Une troisième partie se décompose en bainite et le reste en martensite.
- Pour de très faibles vitesses de refroidissement (V_8), une partie de l'austénite se transforme en ferrite et le reste en perlite.
- Les chiffres inscrits à l'intersection de la vitesse de refroidissement et une courbe de fin de décomposition de l'austénite indiquent le pourcentage massique du constituant formé. Sur une même courbe de vitesse, les pourcentages sont cumulatifs c'est à dire leur somme fait 100%.
- Les courbes de vitesse débouchent toutes vers un cadre qui porte les valeurs de dureté correspondant à chacune d'elles.
- La courbe en trait discontinu est relative à un taux de transformation de 50% d'austénite. M_{50} matérialise 50% d'austénite transformée par refroidissement rapide en martensite.
- La vitesse de refroidissement correspondant à chaque courbe $T=f(\log t)$ sera définie entre 700 et 300°C, soit :

$$V_r = \frac{700 - 300}{t_{300} - t_{700}}$$

On inscrit dans le tableau (V.1) les valeurs des pourcentages de chaque constituant pour chaque vitesse après refroidissement total de l'acier 35CrMo4 ainsi que la dureté correspondante.

vitesse	%F	%P	%B	%M	Dureté (HRC-HV)
1	0	0	0	100	54 HRC
2	0	0	2	98	52.5 HRC
3	0	10	0	90	52 HRC
4	0	0	70	30	40 HRC
5	0	10	75	15	35 HRC
6	15	12	65	8	22 HRC
7	45	35	17	3	226 HV
8	55	45	0	0	187 HV

Tableau V.1 : Pourcentage des constituants après refroidissement de l'acier 35CrMo4.

PROBLEME DE L'AUSTENITE RESIDUELLE :

Pour les nuances, pour lesquels 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.

On peut diminuer la teneur en austénite résiduelle :

- ❖ Par traitement par le froid ou cryogénique vers -80 à -120 °C (on se rapproche du point M_f).
- ❖ Par revenu après trempe.

35 CrMo 4

%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo
0.36	0.77	0.28	0.01	0.019	0.16	0.96	0.28

Austénitisé à 850°C 30min

Grosseur du grain : 9

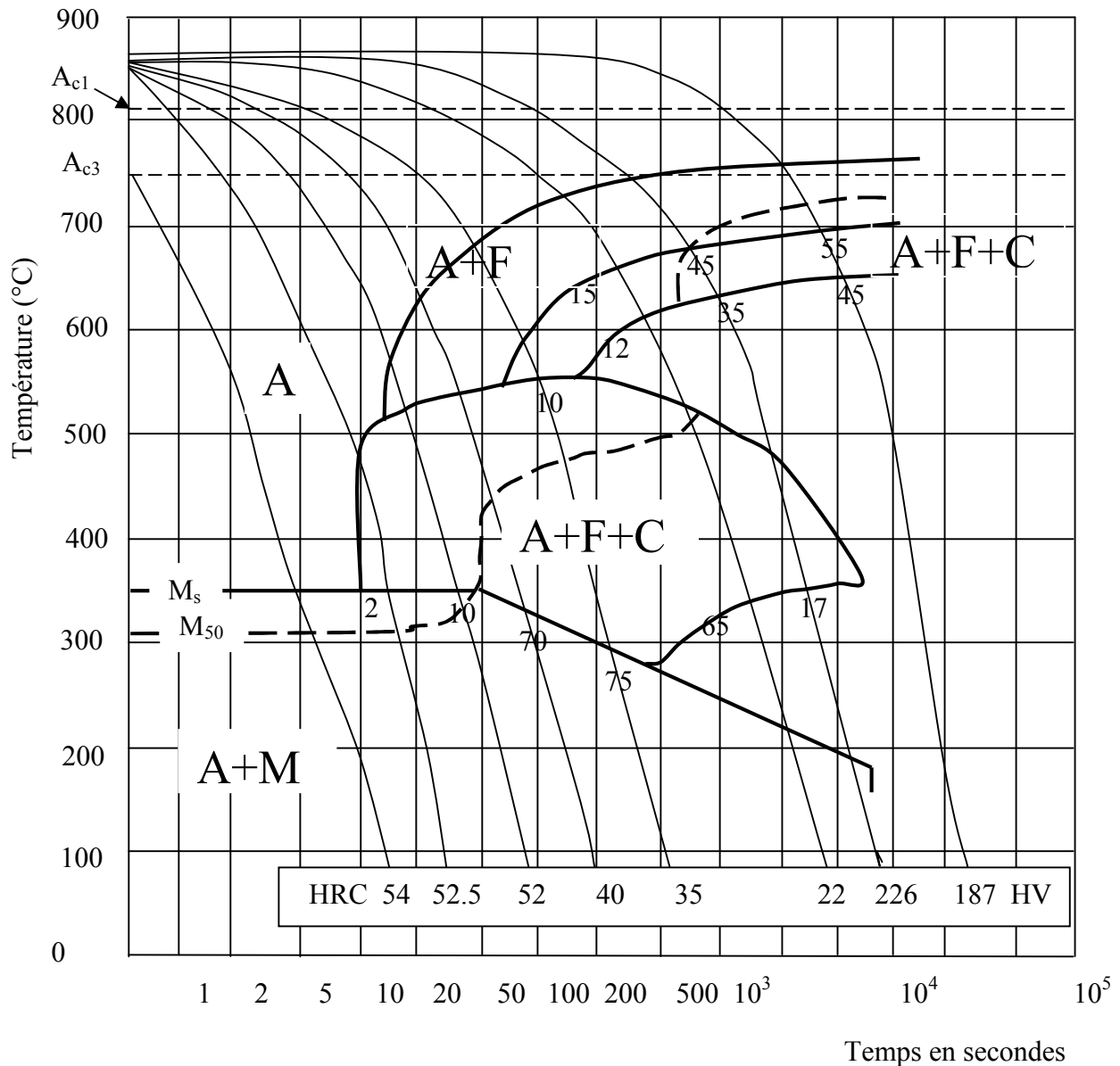


Figure V.1 : Courbe TRC de l'acier 35CD4

VI. APPLICATION :

Soient deux aciers le **30NiCrMo12** et le **60NCrMo11** dont on fournit les courbes **TRC**.

1- Quelle est la différence fondamentale entre ces deux aciers et comment ceci se traduit-il sur les courbes TRC et les propriétés des deux aciers ?

2- On refroidi ces deux aciers après austénitisation à **850°C** pendant **30mn** :

a- A une vitesse de l'ordre de **30°C/s**, quelles sont les structures résultantes des deux aciers et à quoi serait-elle due ?

b- On désire pour une utilisation particulière, avoir une structure d'une dureté d'environ **50 HRC**. Si vous allez utiliser l'un ou l'autre des deux aciers, quel traitement effectueriez vous et quelle est pour chacun la structure résultante.

Quels sont les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'un des aciers par rapport à l'autre ?

3- Est-il possible de connaître à partir de ces diagrammes les structures d'équilibre des deux aciers ? Si oui quelles sont ces structures et leurs duretés respectives ?

4- Pour l'acier **30NiCrMo12** :

Quelles sont les conditions pour lesquelles il est possible d'avoir **60%** de bainite. Quand il y a une différence de dureté entre différents traitements, à quoi est-elle due d'après vous ?

5- Soient deux pièces rondes de diamètre **10mm**, l'une est en **30NiCrMo12**, l'autre en **60NCrMo11**. Ces pièces sont refroidies toutes les deux à l'air après une austénitisation à **850°C** pendant 30mn. Quelles sont les structures ainsi que les duretés respectives des deux pièces ?

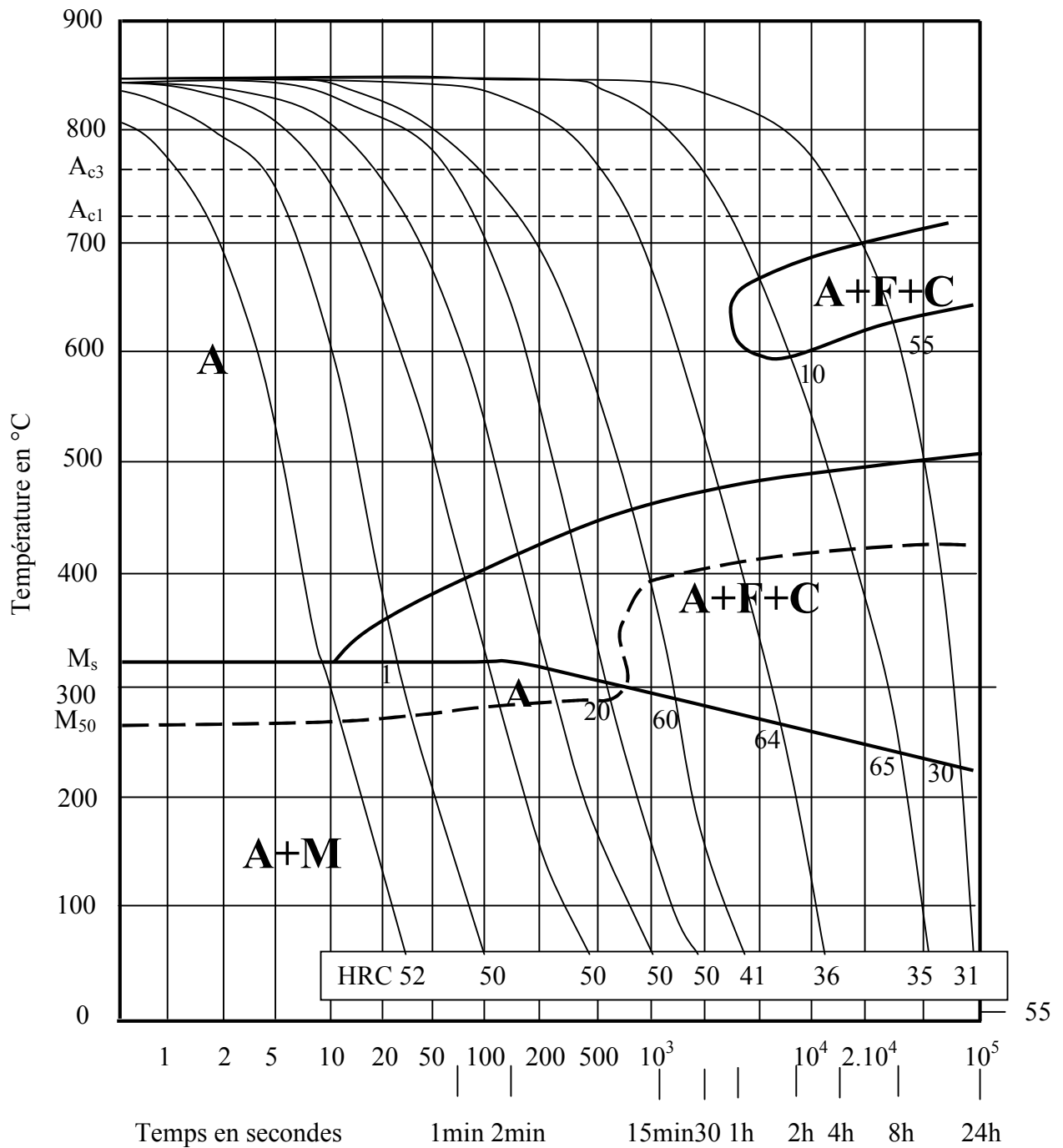
6- Soit une pièce de diamètre **80mm**. On veut qu'à **10mm** de la surface de la pièce, la structure contienne un pourcentage en martensite supérieur à **40%**, et une dureté supérieure à **45 HRC**. Lequel des deux aciers celui que vous choisirez, et dans quel milieu effectueriez vous la trempe? Expliquez.

30 NiCrMo 12

%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu
0.30	0.40	0.30	0.016	0.015	3.2	0.88	0.40	0.17

Austénitisé à 850 °C 30min

Grosseur du grain : 12-13

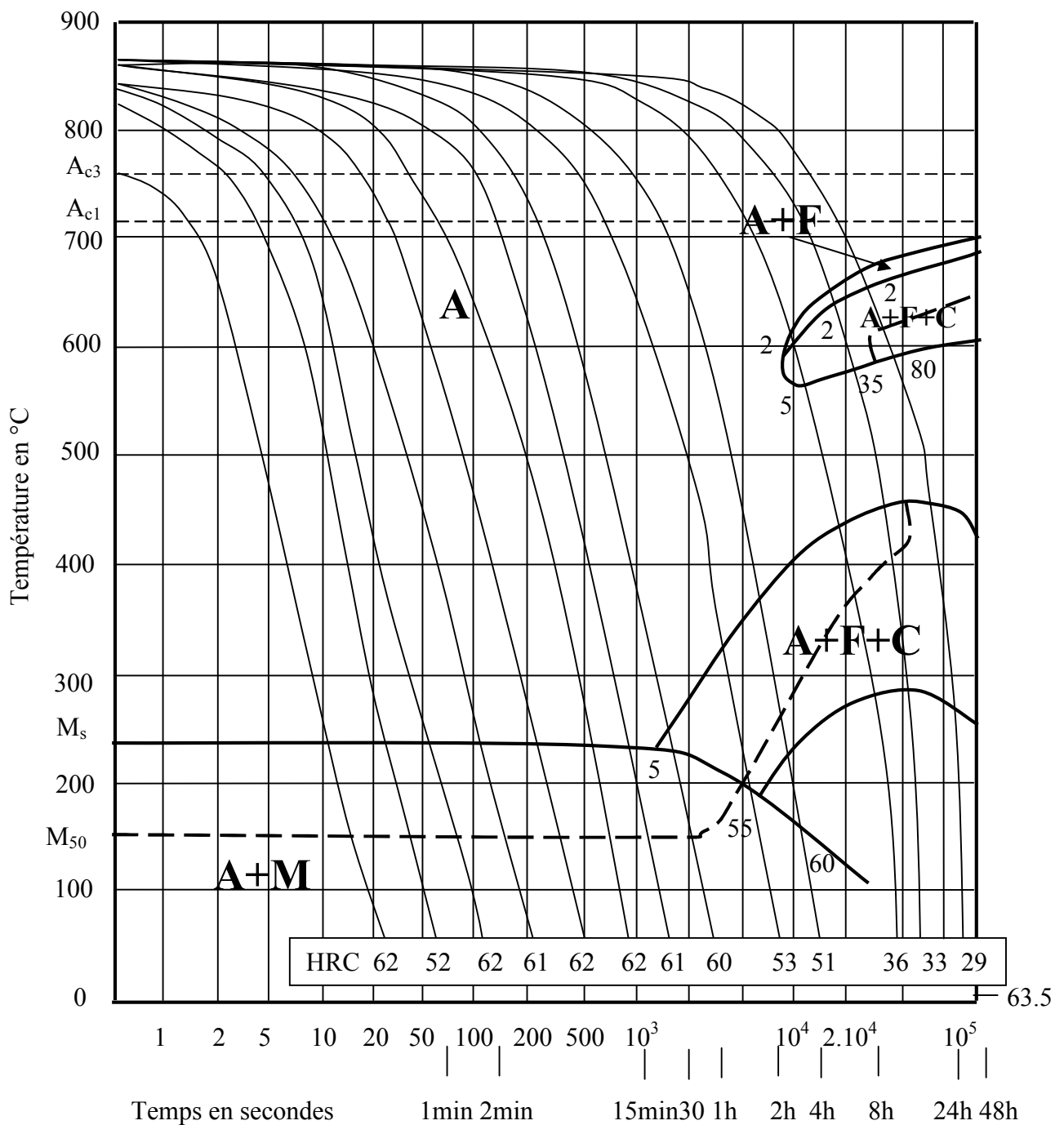


60 NiCrMo 11

%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%As
0.57	0.65	0.31	0.005	0.01	2.35	0.75	0.41	0.13	0.054

Austénitisé à 850 °C 30min

Grosueur du grain : 9-10



T.D traitements thermiques N° 1

On donne le diagramme T.R.C. de l'acier 30NC11.

1°) Préciser les structures obtenues après une austénitisation de 30mm à 850°C et un refroidissement continu suivant les lois de refroidissement conduisant aux duretés suivantes :

- a) 50HRC
- b) 40HRC
- c) 31HRC
- d) 23HRC
- e) 175HV

2°) Après une austénitisation de 30mm à 850°C sur des ronds de 40mm (échantillons A) et sur des ronds de 80 mm (échantillons B), on effectue des trempes à :

- a) L'eau
- b) L'huile
- c) L'air

Préciser les structures et les duretés obtenues dans chaque cas.

3°) On souhaite obtenir une pièce de diamètre supérieure à 20mm à structure entièrement martensitique. Quelle solution préconisez-vous ?

4°) Déterminer la vitesse critique de trempe martensitique et donner la dureté correspondante.

T.D traitements thermiques N° 2

Exercice 1

Soit l'acier 30NC11 dont on fournit les diagrammes TTT et TRC :

- 1- Expliquer la désignation ,quel est l'élément d'alliage majeur ?
- 2- Cet acier est austénisé à 850°) pendant 30 mn , il est ensuite refroidi jusqu'à 600°C et maintenu à cette température :
 - a) Au bout de combien de temps commence la transformation de l'austénite ?
 - b) Quelle est la structure de l'acier à 600°C au bout de 30mn ?
 - c) Au bout de 20 000 secondes, la pièce est retirée du four et refroidie à l'air .
Quelle sera sa structure à la température ambiante ainsi que sa dureté ?

3-On désire conférer à cet acier une dureté meilleure, à cet effet, on effectue le maintien isotherme à une température plus basse, quel traitement suggérez vous si on désire avoir une pièce de dureté égale à 39 HRC ? Quelle sera la structure résultante ?

4-on désire avoir une structure qui contient 50⁰/₀ de (ferrite+bainite)et 50⁰/₀ de martensite, quel traitement suggérez vous?

5-Après austénisation à 850°C pendant 30mn, l'acier est refroidi dans l'eau et la vitesse moyenne est estimée à 22°C/s ,quelle structure résultante à l'ambiante et quelle sera sa dureté ?

6-Si on désire avoir dans des conditions de refroidissement continu une dureté proche de celle obtenue pour la 3^{ème} question , quel traitement suggérez vous et quelle structure résultante ? Si vous aviez à choisir entre l'un de ces 2 traitement lequel proposeriez vous ?justifiez votre réponse.

7-Pendant austénisation à 850°C d'une pièce de 30NC11un accident provoque la chute de la température jusqu'à 850°C à une vitesse de l'ordre de 0.35°C/s l'acier reste à cette température pendant 50secondes, le temps qu'on s'aperçoit de la panne , l'acier est alors refroidi dans l'eau (v=22°C/s).

a)Quelle est la structure résultante de ce traitement accidentel ?Donner approximativement le %des différents composants de la structure.

b)Le but avant cet accident était d'obtenir une structure de dureté comprise entre23 et 26 HRC ?est-ce qu'il est nécessaire de refaire un autre traitement sur une autre pièce ? lequel ?

8-On austénise l'acier 30NC11 à 900°C pendant 30mn, puis on fait un maintien à 500°C, est ce que le début de transformation de l'austénite aura lieu au bout de 5 secondes ?

Pourquoi ?Quelle sera la structure au bout de 100secondes ?

Exercice 2

Soient 2 aciers le 30NCD12 et 60NCD11 dont on fournit les courbes TRC

1- Quelle est la différence fondamentale entre ces 2 aciers et comment ceci se traduit-il sur les courbes TRC et les propriétés des 2 aciers ?

2- On refroidit ces 2 aciers après austénisation à 850°C pendant 30mn :

a)A une vitesse de l'ordre de 30°C/s , quelles sont les structures résultantes des 2 aciers et à quoi serait-elle due ?

b)On désire , pour une utilisation particulière, avoir une structure d'une dureté d'environ 50HRC .Si vous allez utiliser l'un ou l'autre des 2 aciers, quel traitement effectueriez vous et quelle est pour chacun la structure résultante.

Quels sont les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'un des aciers par rapport à l'autre ?