

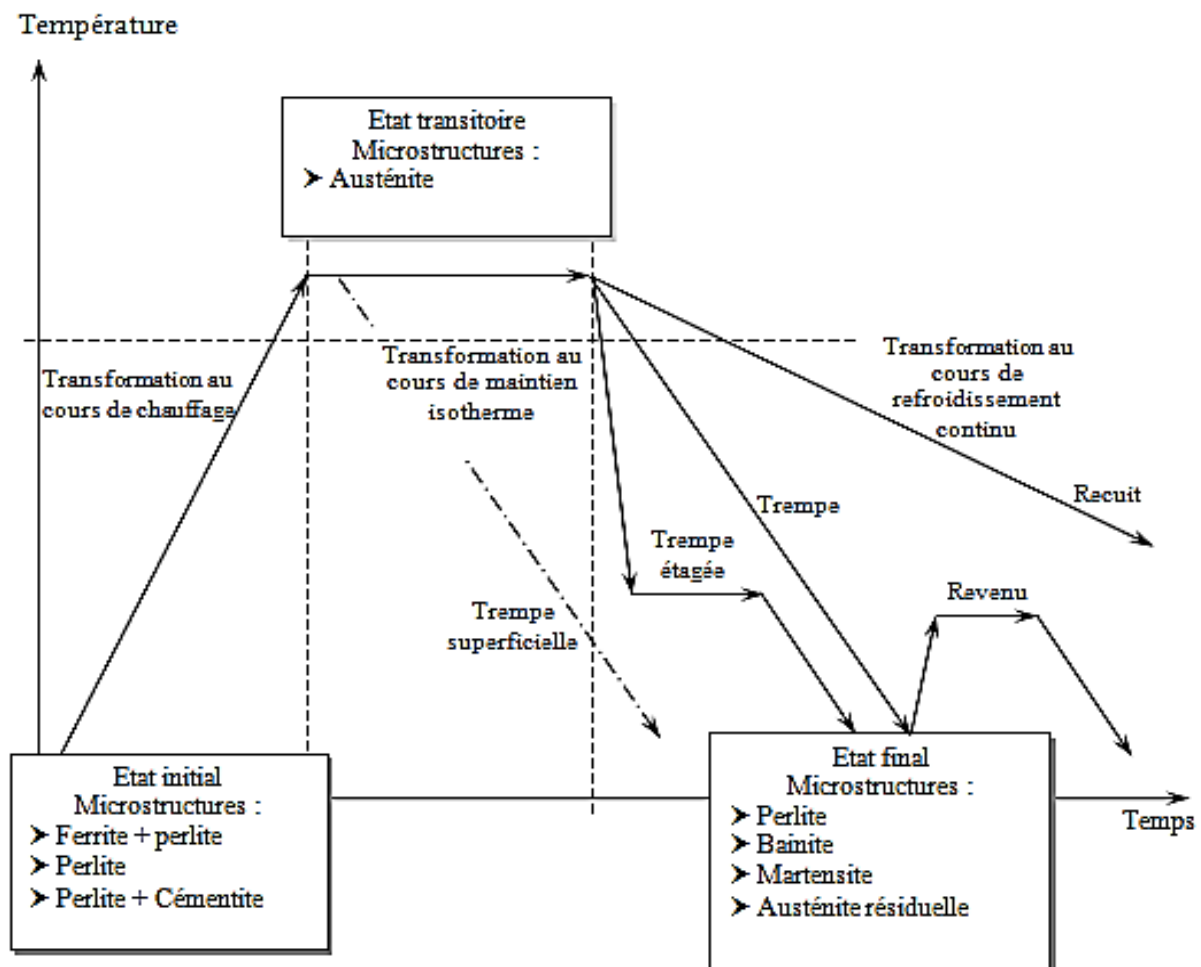
Chap.3.Traitements thermiques des aciers.

1. Définition :

La norme NF EN 10052 a retenu la définition par pour traitement thermique comme suit : c'est une succession d'opérations au cours desquelles un produit ferreux solide est soumis en totalité ou partiellement à des cycles thermiques pour obtenir un changement de ses propriétés et/ou de sa structure.

Les cycles thermiques appliquées à des vitesses de chauffage et de refroidissement jouent un rôle essentiel et peuvent provoquer des modifications sur:

- La microstructure (transformations de phases, taille de grains, précipitation...)
- les propriétés mécaniques, dureté et fragilité...
- mais la composition chimique reste inchangée

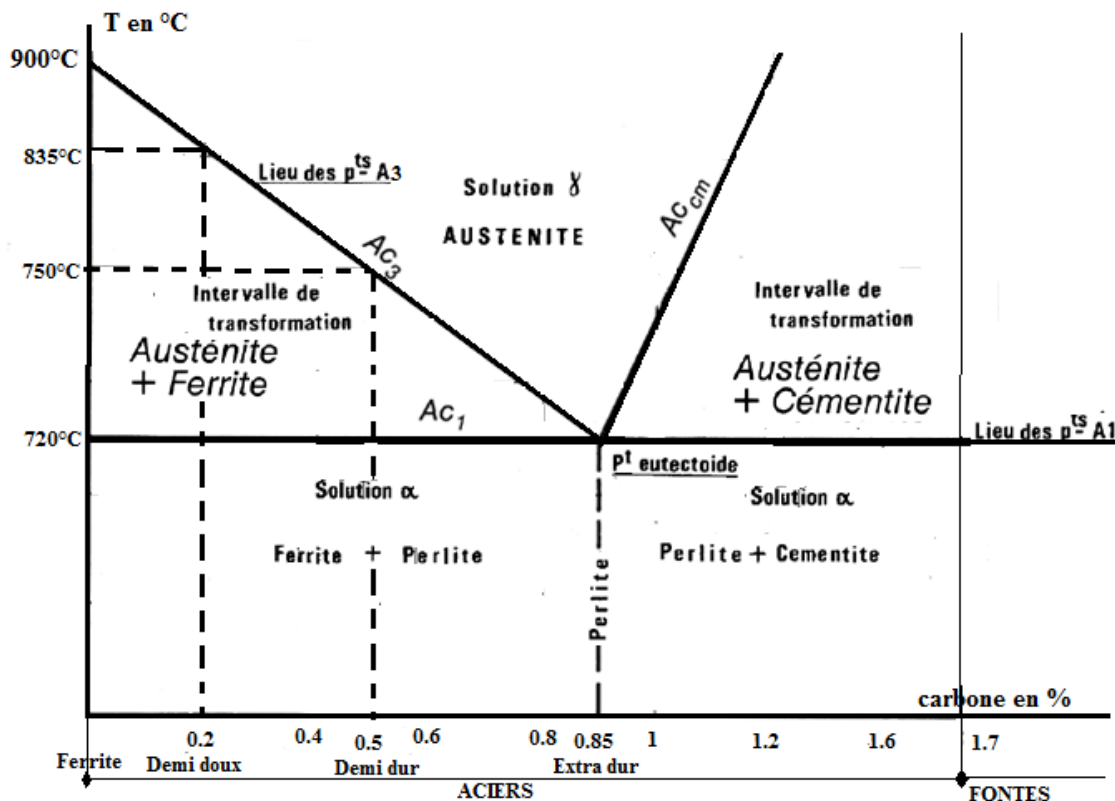


Lors d'un traitement thermique, On joue sur 3 variables ;

- la température : la montée en température, le maintien à température et le refroidissement.
- le temps (durée de séjour dans le four selon la forme et les dimensions)
- le milieu de séjour durant le maintien en température (neutre ou réactif).

2. Points de transformation des aciers :

Le diagramme représente les transformations des aciers qui interviennent uniquement dans l'état solide (en dessous de 1145°). Le point d'**Eutexie** des alliages fer-carbone correspondant à la fonte blanche est à 1145°C pour 4,3 % de carbone.



En dessous des points A1 (720°): On obtient une solution stable à froid (solution α) de **Ferrite** ou **Perlite** ou (**Ferrite+Perlite**) ou (**Perlite + Cémentite**) elle est "**malléable**" dont la constitution dépend du % carbone.

Au-dessus des points A3 (720°C à 1145°C): On obtient une solution stable ou le carbone se trouve dissout dans le fer (solution γ ou carbure de fer). On obtient un nouveau constituant **Austenite**.

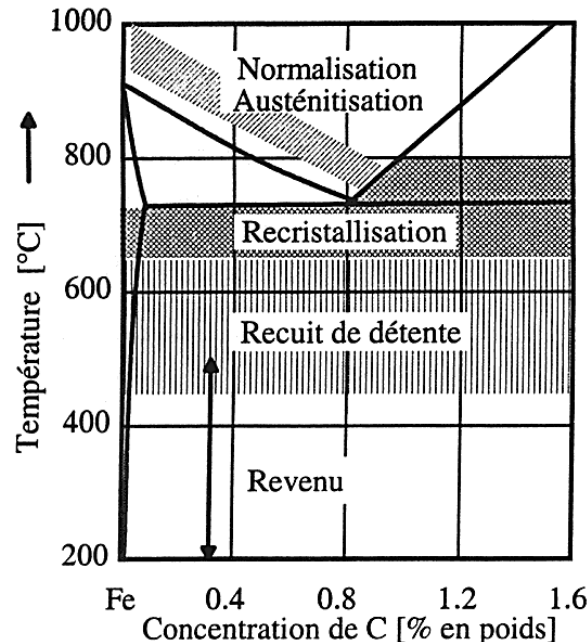
Entre les points A1 et les points A3 : La connaissance du Point **A3** d'un acier correspond à la température de mise en solution du carbone. L'intervalle de température entre **A1** et **A3** (plus ou moins important en fonction du % carbone) est nécessaire à la transformation de la mise en solution.

L'austénitisation des aciers :

Austénitiser un acier est une condition absolument nécessaire pour pouvoir le traité thermiquement. Les conditions d'austénitisation sont:

Chauffage : La température d'austénitisation dépend de la teneur en carbone et des éléments d'addition. En général au-delà de A_{c3} . Pour éviter les déformations et les tapures, le chauffage doit être lent. Parfois on recommande plusieurs préchauffages pour les cas des pièces massives ou devant être traitées à haute température (cas des aciers rapides).

- Pour les aciers Hypo eutectoides ($\theta_a = A_{c3} + 30$ à 50°C).
- pour les aciers Hyper eutectoides ce sont des cas typique d'austénitisation partielle, ($\theta_a = A_{c1} + 50^\circ\text{C}$).



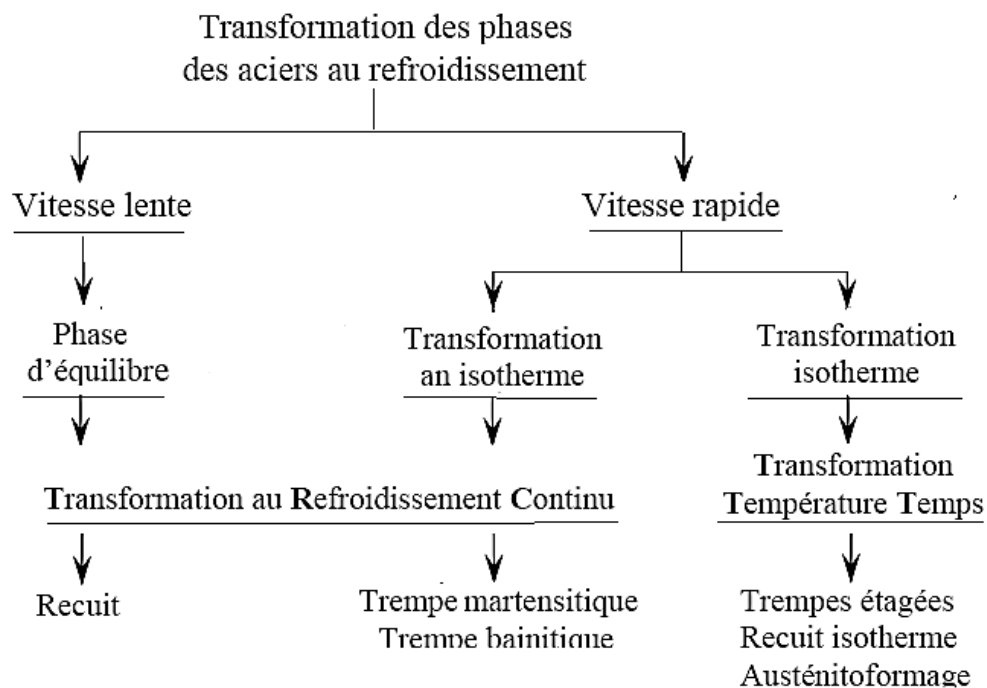
Maintien : pour permettre la mise en solution de l'austénite et de son homogénéisation. Le temps de maintien est fonction de la massivité de la pièce. Il

est compte à partir du moment où le cœur de la pièce est à la température de trempe. 2 à 3 mn / mm d'épaisseur à partir de la température ambiante.

3. Transformations des phases des aciers au refroidissement.

Selon la vitesse de refroidissement on distingue deux modes de refroidissement :

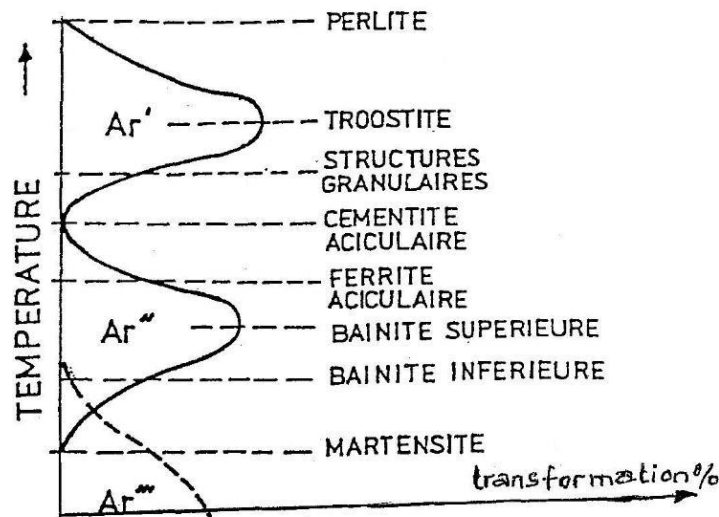
- refroidissement lent : les transformations surviennent en phase d'équilibre
- refroidissement rapide : qui peut s'opérer en isotherme ou en an isotherme (continu)



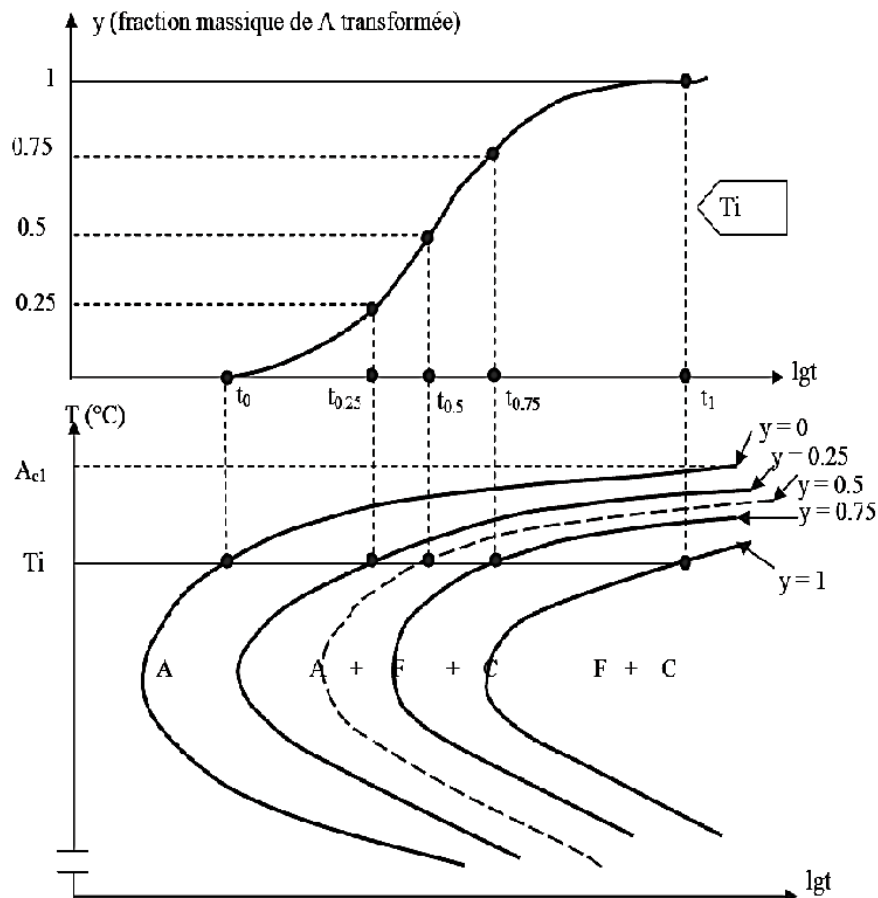
3.1. Transformation au cours de maintien Isotherme

La transformation de l'austénite s'effectue par le refroidissement qui suit le maintien à une température inférieure à Ar_1 dans un bain du sel ou de plomb.

Cette transformation isotherme, de l'austénite concerne les **diagrammes T.T.T (Transformation en fonction de la Température et du Temps.)**. On distingue trois domaines de températures : Ar' , Ar'' , et Ar''' concernant les transformations isothermes ainsi que an isothermes.



3.1.1. Transformation perlitique Ar' : La décomposition de l'austénite s'effectue après un certain temps appelé : période d'incubation (noté τ_0)



Deux cas suivants sont retenus :

Acier hypoeutectoïde : Les premiers grains sont la **ferrite α** étant la phase directrice, puis il y'aura formation de la **perlite lamellaire ($\alpha + Fe_3C$)**.

Acier hypereutectoïde : Les premiers dépôts de la **cémentite Fe_3C** étant la phase directrice puis il y'aura formation de la perlite fine :

- Si la température de transformation est plus basse. La perlite lamellaire très fine est appelée **troustitite**.
- Si la température de transformation est très proche de **Ar1**, On obtient la perlite globulaire.

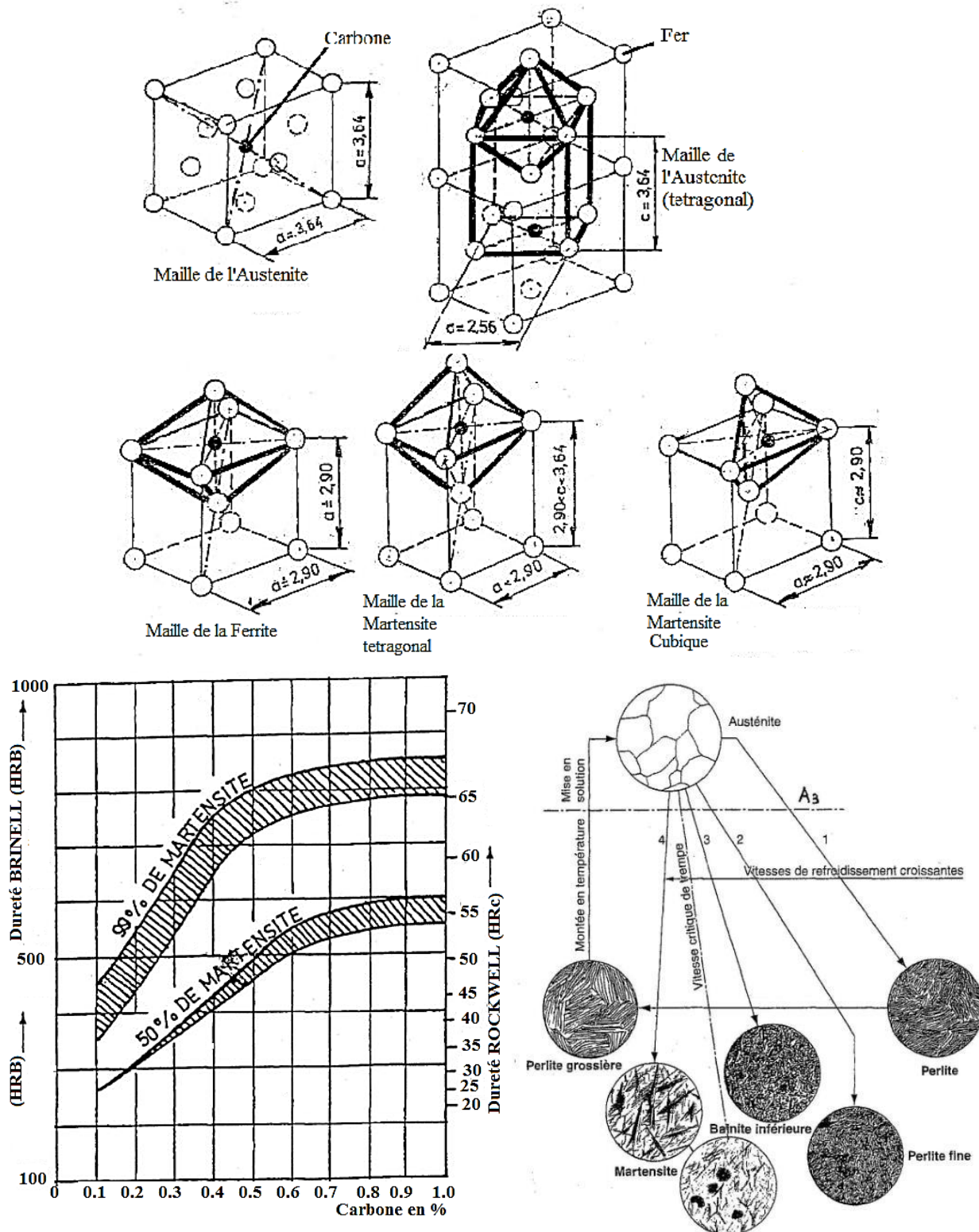
3.1.2. Transformation Ar'' : En dessous de $600 - 550^\circ \text{C}$ il y'a lieu de la décomposition de l'austénite en **bainite**. Cette transformation s'effectue par le phénomène appelé la germination et croissance.

Les caractéristiques de **la bainite** sont : Structure ferrito– cémentitique: L'élément directeur de la transformation est la ferrite. Suivant la température de la transformation on distingue La bainite supérieure, la bainite moyenne et la bainite inférieure.

3.1.3. Transformation martensitique Ar''': La martensite est une solution solide **d'insertion sursaturée de carbone dans le fer α** . Ainsi les atomes de carbone sont emprisonnés dans la maille tétraгонаlement déformée. La maille acquiert une structure quadratique dont les paramètres de la maille sont fonction de la teneur en carbone .Ce changement du volume spécifique engendre des déformations et des contraintes internes dans la pièce qui subit cette transformation.

La transformation martensitique est une transformation de l'austénite qui se fait à une vitesse extrêmement grande. Elle procède sans diffusion et est uniquement fonction de la température et ne dépend pas du temps.

La transformation martensitique s'effectue dans les limites des températures **Ms (Martensite Start)** et **Mf (Martensite Finish)**. Les températures Ms et Mf dépendent de la teneur en carbone, des éléments d'alliage et de la grosseur moyenne de l'austénite.L'influence des éléments d'alliages sur la dureté de la martensite est négligeable.



L'austénite résiduelle : La transformation martensitique est complète à condition du refroidissement soit **au-dessous de M_f**, cette température est au-dessous de la

température ambiante (pour la plupart des aciers). De ce fait, une partie de l'austénite reste non transformée c'est l'austénite résiduelle (une structure douce). La Proportion de l'austénite résiduelle est fonction de la composition chimique d'un acier et par suite, de **Ms** et **Mf**.

La décomposition supplémentaire de l'austénite résiduelle par chauffage est accompagnée par une augmentation du volume spécifique ce qui engendre de nouvelles contraintes internes dans la masse d'acier ce qui se manifeste par un Durcissement secondaire : Abaissement de la ténacité et par augmentation de la dureté. Les aciers à bas taux de carbone ne sont pas sensibles à l'austénite résiduelle car sa quantité étant très faible ou nulle.

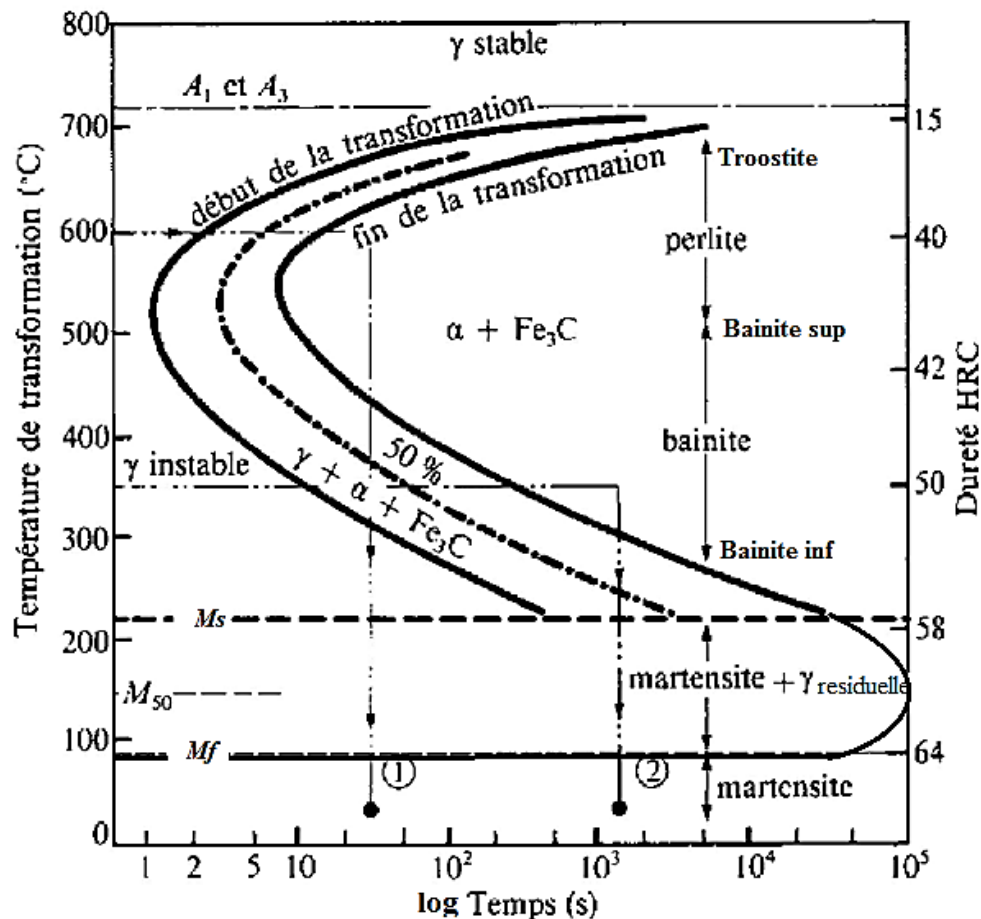


Diagramme TTT de l'acier au carbone Eutectoïde

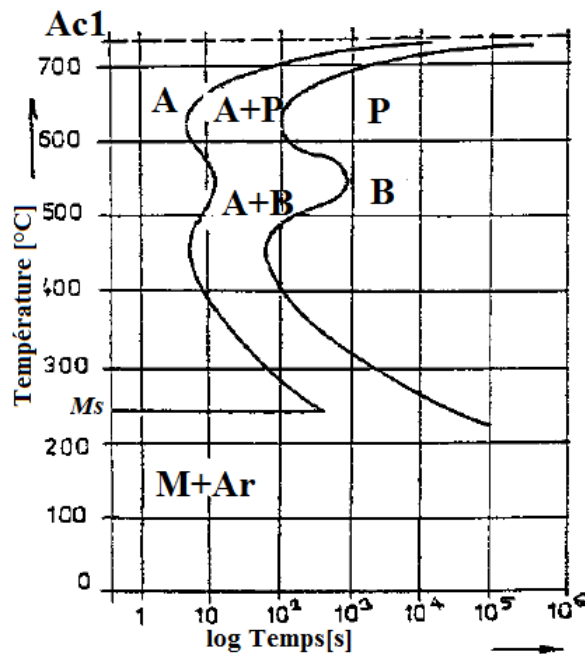


Diagramme TTT de l'acier eutectique

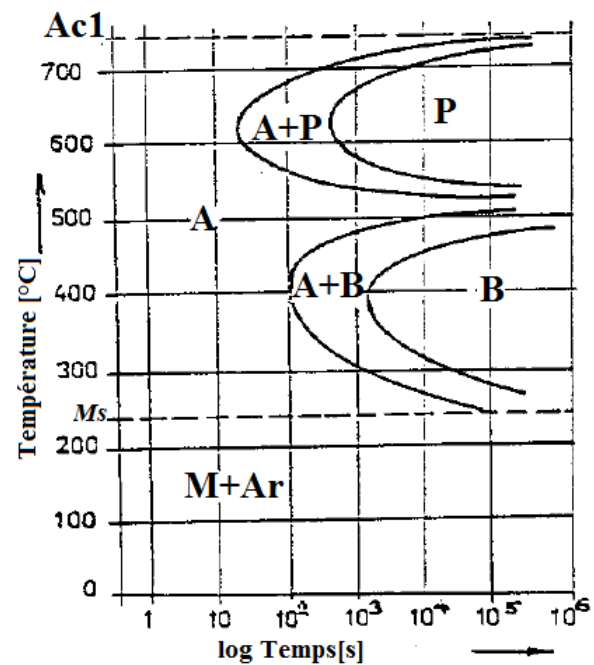
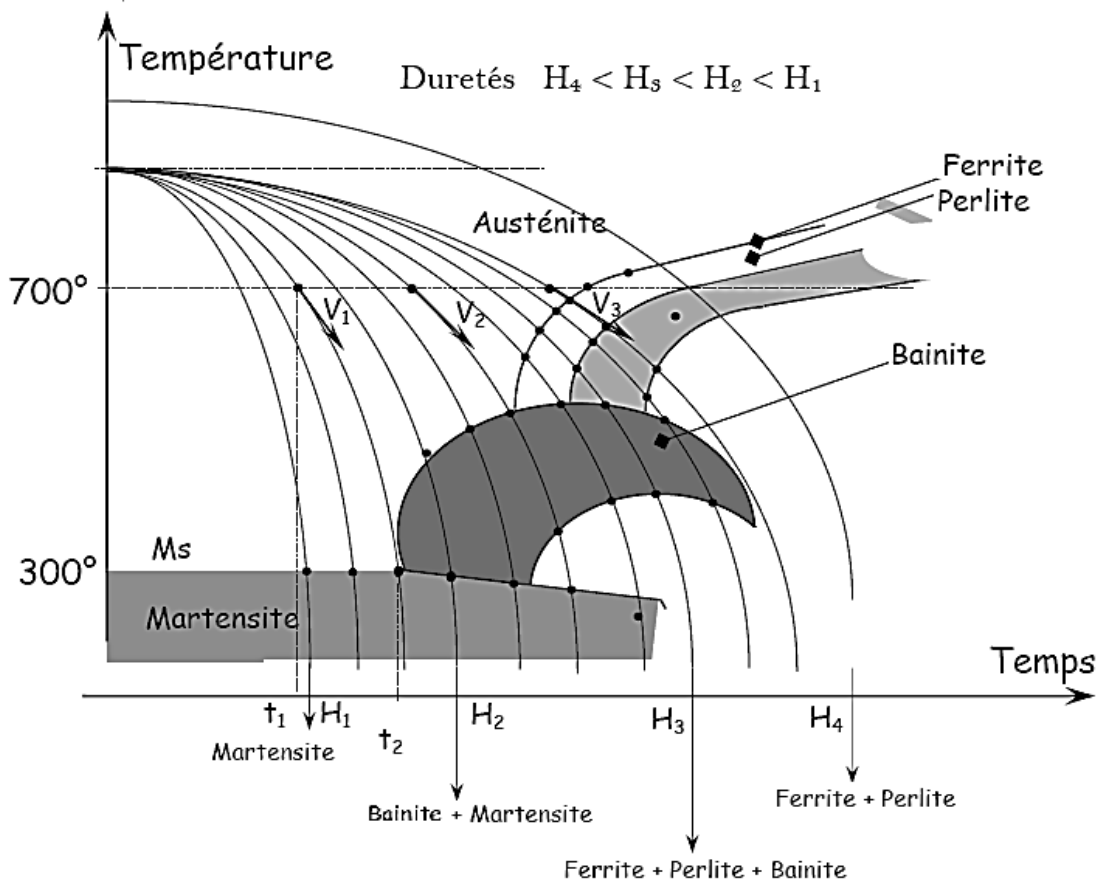


Diagramme TTT de l'acier allié

3.2. Transformations au Refroidissement Continu (TRC)

Les courbes sont tracées suivant une échelle semi-logarithmique. Ce sont des courbes de refroidissement correspondant à des lois de refroidissement différentes (Selon le fluide de trempe utilisé lors d'un refroidissement l'air, l'huile et l'eau). Elles permettent de déterminer pour différentes conditions de refroidissement, allant du refroidissement très rapides (plusieurs centaines de degrés /seconde) au refroidissement très lents (quelques degrés/ heures), la nature des constituants formés lors de ces refroidissements, les températures de transformation et la dureté de la structure à l'ambiance

Le point d'origine de ces courbes sur l'axe des températures est la température d'austénisation. Pour chaque loi de refroidissement, on repère les températures auxquelles se sont amorcées les transformations, ainsi que le temps. Après refroidissement, on identifie les constituants obtenus et on contrôle leur dureté ROCKWELL et VICKERS pour les plus faibles. Il est ainsi possible en joignant les différents points repérés de délimiter les zones de formation d'un même constituant et de tracer leur enveloppe. 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



4. Classification des de traitements thermiques :

Les aciers peuvent acquérir des caractéristiques élevées par un cycle ou une succession de cycles thermiques (chauffage - refroidissement). Il existe deux types de traitements :

- Les traitements thermiques
- Les traitements chimico-thermiques (traitements superficiels)
- Les traitements thermomécaniques

5. La trempe :

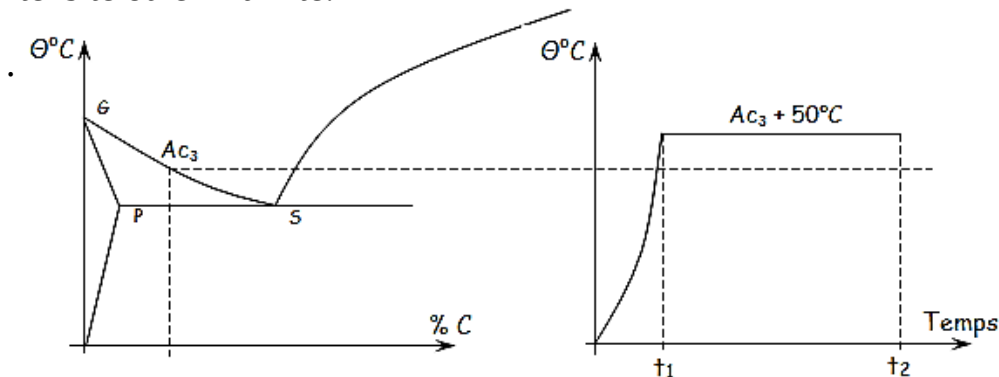
5.1.Définition : C'est un traitement thermique de durcissement consistant à chauffer une pièce en acier au carbone a une température supérieure à la ligne de transformation fer $\alpha \rightarrow$ fer γ (austénitisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une afin d'améliorer ses propriétés mécaniques (dureté maximale).

5.2. Cycle thermique de la trempe:

- **Chauffage** $\geq A_{c3}$: La température d'austénitisation dépend de la teneur en carbone et des éléments d'addition. Aciers Hypo eutectoides ($\theta_a = A_{c3} + 30$ à 50°C), Aciers Hyper eutectoides, ($\theta_a = A_{c1} + 50^\circ\text{C}$).

- **Maintien** : en température constante suffisamment pour l'homogénéisation la chaleur sur tout le volume de la pièce et mettre en solution l'austénite. Le temps de maintien est fonction de la massivité de la pièce. En général entre 15 et 30 minutes à partir de la température ambiante. On compte 2 à 3 mn/mm d'épaisseur.

- **Refroidissement** : Le refroidissement à l'eau, à l'huile, à l'air soufflé ...en fonction du constituant et de la structure souhaitée. il doit être rapide à partir de la température de trempe jusqu'à une température plus basse (très différente de la température ambiante) pour transformer l'austénite en un constituant plus dur, soit en Martensite ou en Bainite.



5.3. Facteurs influençant la qualité de la trempe :

- Pouvoir refroidissant du bain
- Masse de la pièce : plus la pièce est grosse, plus le refroidissement n'est pas homogène.
- Conductibilité thermique
- Etat de surface

L'Aptitude d'une pièce à la trempe dépend :

- de l'intensité du durcissement : correspond à la dureté maximale (martensite) que l'on peut espérer. Elle dépend de la teneur en carbone en solution dans l'austénite.
- de la trempabilité : variation de dureté entre le cœur et la surface d'une pièce. La trempabilité dépend :

- de la composition chimique quantités de carbone et des éléments d'alliages en solution dans l'austénite.
- des conditions d'austénitisation
- de la grosseur du grain austénitique

5.4. Effets de la trempe :

- La trempe augmente : la résistance à la rupture, la limite élastique, la dureté
- La trempe diminue : la résilience, l'allongement, la striction.

5.5. Types de trempe:

- la trempe avec refroidissement continu (TRC)
- la trempe avec refroidissement par étapes (avec maintien isotherme).

5.6. Défauts et Problèmes liés à la trempe :

La surface du métal refroidit plus vite que l'intérieur ainsi la trempe pourra être plus efficace en surface. Pour homogénéiser la trempe il faut réduire les écarts de vitesses de refroidissement. Des irrégularités de chauffage provoquent des défauts de trempe :

- Une surchauffe prolongée modifie la structure cristalline (grossissement des grains, diminution de leur cohésion) c'est le brûlage.
- Des réchauffages trop fréquents provoquent une décarburation, c'est à dire neutralisent les effets de la trempe.
- Un chauffage non protégé provoque une oxydation, qui isole le métal de son fluide de trempe, et réduit les effets de la trempe.
- Des irrégularités de températures provoquent des tensions internes, qui occasionnent des fissures (les tapures).

Ce durcissement est souvent la première étape d'un procédé complexe comprenant ensuite un ou plusieurs revenus.

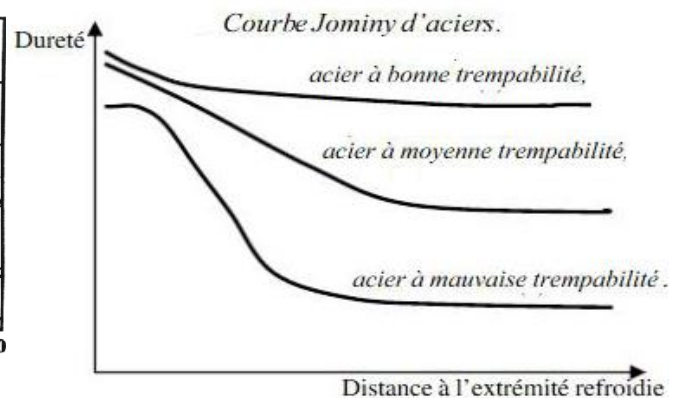
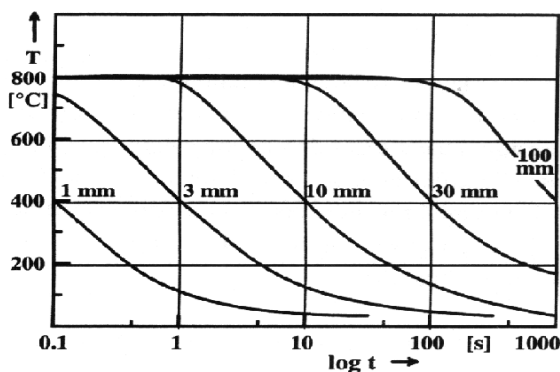
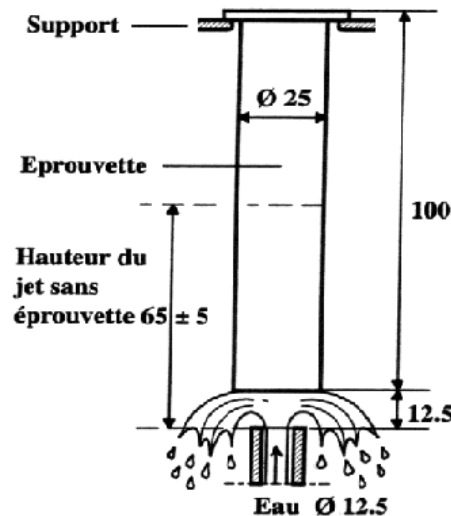
5.7. Trempabilité des aciers par trempe en bout : (essai Jominy)

Consiste à évaluer l'aptitude d'un acier à subir la trempe. L'essai JOMINY définit les conditions de réalisation de cette évaluation. Cette technique consiste à Austénitiser dans les conditions convenables une éprouvette JOMINY normalisée puis à tremper la base inférieure de cette éprouvette, tenue à l'aide d'un support

approprié par un jet d'eau courante de température comprise entre 15 et 25 °C jusqu'à son refroidissement total par conduction on mesure la variation de la dureté sur un méplat de la génératrice de l'éprouvette à partir de son extrémité trempée selon les distances : 1.5, 3, 5, 7, 9, 10, 13, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 70.

La courbe de la dureté H (HRC, HV) en fonction de la distance d(mm) entre la base refroidie et le point de relèvement de la mesure de dureté qui portera le nom de courbe Jominy permet de déterminer la trempabilité de l'acier.

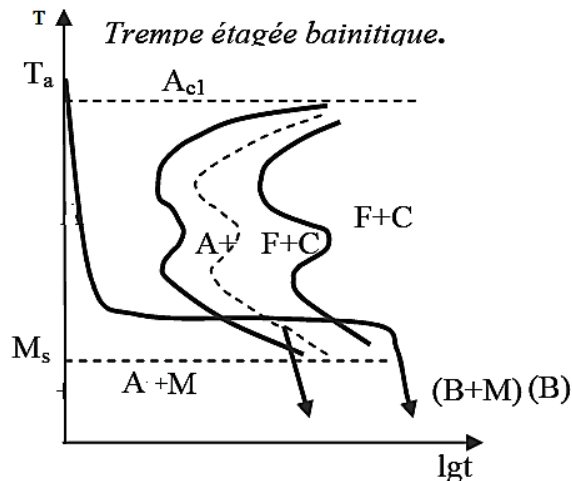
La vitesse de refroidissement diminue très rapidement vers l'intérieur de l'éprouvette. Pour les aciers au carbone qui ont des courbes TRC ayant le nez du début de la transformation perlitique déjà à environ une seconde (0.4 s pour 0,15% C jusqu'à 4 s pour 1% C), une trempe à l'eau ne provoque la formation de la martensite



Trempe étagée bainitique :

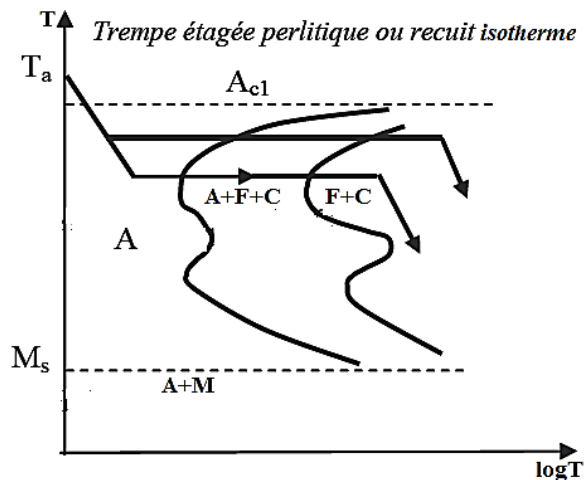
Après austénitisation, la pièce est portée et maintenue à une température légèrement supérieure à M_s . Contrairement au cas de la trempe étagée martensitique, le maintien est suffisant pour que la transformation bainitique ait lieu totalement ou partiellement si t_1 est trop élevé. Dans ce dernier cas, on obtiendra une structure B+M après retour à l'ambiante. Le traitement parfaitement isotherme réduit au minimum les déformations de trempe et la bainite inférieure obtenue possède des caractéristiques aussi bonnes que le revenu n'est pas nécessaire ici car R_e , K sont aussi bonnes que celles d'une martensite revenue.

Cette possibilité est utilisée pour les nuances présentant une haute fragilité de revenu et pour les pièces de faibles dimensions et de formes compliquées.



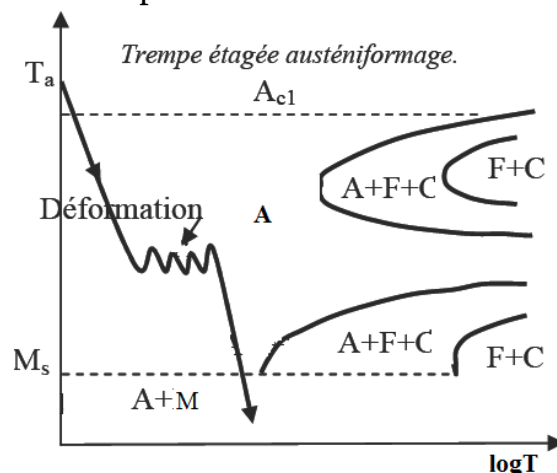
La trempe étagée perlitique ou recuit isotherme :

On peut effectuer le maintien isotherme dans le domaine de la perlite, laisser la transformation s'achever puis refroidir. 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. Ce traitement conduit à des résiliences plus faibles, à une dureté égale, que le traitement de trempe et revenu usuels.



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%.



6. Le revenu des aciers :

La trempe aboutit à une structure martensitique très dure, donc très fragile. Le but du revenu est de modifier la structure pour obtenir un bon compromis dureté/fragilité. Le revenu est un traitement thermique effectué après trempe qui consiste à chauffer une pièce à une température inférieure au point de transformation $T_R < A_{c1}$, à la maintenir de durée t_R à T_R à cette température, puis à

la refroidir longuement généralement à l'air, parfois à l'eau jusqu'à la température ambiante. La température de revenu se situe généralement entre 200 et 500 °C, elle dépend des caractéristiques finales que l'on veut obtenir, est entre 550 et 650 °C Pour les aciers fortement alliés. Le revenu diminue aussi les contraintes résiduelles de trempe.

6.1. Effets du revenu :

Après la trempe : on obtient un mélange de :

- martensite
- austénite résiduelle (non transformée pendant le revenu)
- bainite (éventuellement)
- carbures

Pendant le revenu : on obtient un changement de propriétés par changement de structures, ainsi :

- la martensite se transforme en ferrite et en carbures
- l'austénite résiduelle se transforme en martensite et en bainite

6.2. Précautions à prendre:

- les pièces doivent être complètement refroidies avant le début pour être sûr que la transformation martensitique est terminée.
- le revenu suit immédiatement la trempe pour éviter la rupture des pièces qui peut se produire plusieurs heures, voire plusieurs jours après la trempe.

6.3. Types de revenus

Revenu de relaxation ou de détente :

Il s'effectue entre 180° C et 220 jusqu'à 250° C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes dues à la sursaturation en carbone du fer α issue de la trempe. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle.

Revenu de structure ou classique :

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 450° et Ac1. On observe une augmentation des caractéristiques K, A% et Z et une diminution plus importante de H, Rm, et Re. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.

Revenu de durcissement (ou durcissement structural) :

Des revenus effectués entre 450° et 600° C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). provoque la précipitation des éléments carburigènes pendant le maintien en température en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas une fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires).

7. Le Recuit :

Opération thermique qui annule les effets des traitements thermiques ou mécanique antérieurs en général après la mise en forme (forgeage, moulage, soudage), et quelques fois après l'ébauche (recuit de détente). Il est adapté à l'élimination ou à la réduction des effets néfastes de la ségrégation, l'écrouissage et les contraintes de soudage etc. D'une manière générale, le recuit a comme conséquence le retour à un équilibre physico-chimique et/ou mécanique plus ou moins complet, lié éventuellement à une tendance vers l'équilibre structural.

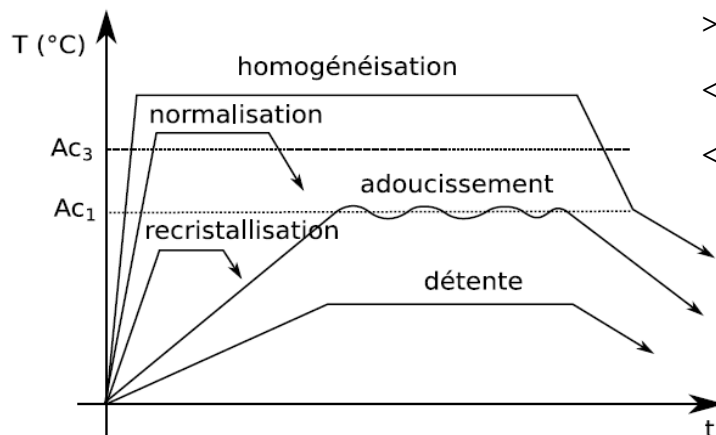
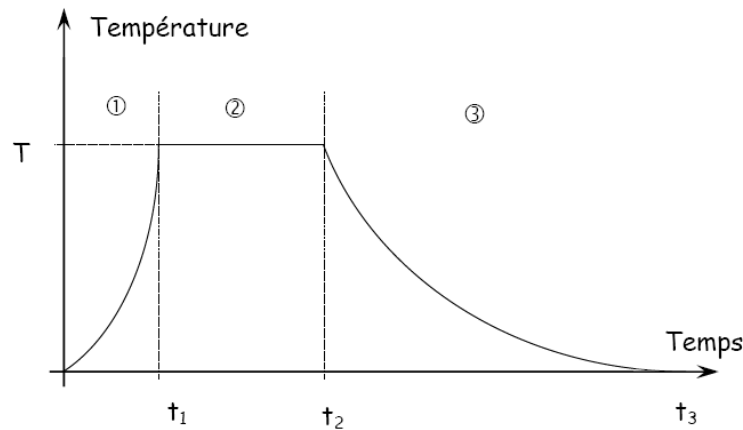
Le recuit conduit aux caractéristiques de ductilité les plus grandes (A%, K) et aux caractéristiques de dureté les plus faibles (H, E, R).

7.1. Cycle thermique de recuit :

Le cycle thermique de recuit comprend :

- Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de correction à réaliser.

- Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- Un refroidissement à l'air calme ou selon une loi programmée, La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit V_3 .



> AC_3 : homogénéisation, normalisation.

< AC_3 : adoucissement,

< AC_1 : recristallisation, détente.

7.3. Différents types de recuits

7.3.1. Recuit d'homogénéisation : Se pratique après moulage ou corroyage, à haute température (950 -1200 °C). La vitesse de refroidissement ne doit pas être trop élevée: de 20 à 60 °C/heure.

7.3.2. Recuit de normalisation : Appliqué après un maintien à haute température (moulage, forgeage, homogénéisation) pour augmenter la grosseur du grain. Elle procure un affinage du grain pour obtenir un état structural de référence (avant la trempe par exemple). La finesse du grain est proportionnelle à la vitesse de chauffe. La température de traitement est d'environ $AC_3+50^{\circ}C$. Le refroidissement (AC_3 - AC_1) est rapide (pas trop sinon c'est trop dur), puis le refroidissement à l'air.

7.3.3. Recuit d'adoucissement ou de globulisation : Après traitement, on obtient une structure de perlite globulaire dans une matrice ferritique. Une structure correspondant à la dureté minimale de l'acier pour faciliter la mise en forme à froid ou l'usinage par outils coupants. Pour affiner le grain, on peut faire un recuit de normalisation avant l'adoucissement.

	Hypo-eutectoides (% C < 0.80)	Hyper-eutectoides (% C > 0.80)
chauffage	AC3 + 30°C	≈ AC1 ou > AC3 pour homogénéiser la structure
refroidissement	20 °C/h jusqu'à 600°C puis à l'air	jusqu'à $T \leq AC1$ (700°C), maintien pendant ≈10h

7.3.4. Recuit de détente (ou stabilisation ou relaxation) : Il vise à éliminer les contraintes internes produites par la mise en forme, la solidification, le soudage ou l'usinage. On chauffe la pièce jusqu'à une température comprise entre 600 et 650°C, puis on refroidit lentement.

7.3.5. Recuit de recristallisation : S'effectue après une déformation à froid (emboutissage, extrusion, étirage à froid, . . .) qui provoque toujours un écrouissage et l'augmentation de certaines caractéristiques mécaniques (σ_e , dureté...). Ce traitement permet une restructuration des caractéristiques initiales du matériau. La Température de recristallisation dépend du taux d'écrouissage de la pièce. Par exemple : 75% - 300°C, 5% - 700°C pour des aciers non alliés.

7.3.6. Recuit de grossissement du grain : Se fait au-dessus de la **température critique** pour le grossissement du grain avec un refroidissement lent. La structure confère au matériau une faible ténacité, ce qui est indésirable en général, mais on obtient une amélioration de l'usinabilité. On usine donc puis on fait un recuit de normalisation pour affiner le grain.

7.3.7. Recuit magnétique : Il est appliqué aux pièces en fer pur utilisées dans les appareils électromagnétiques. Il redonne au fer ses propriétés magnétiques qu'il perd à la suite de déformations plastiques qu'il a pu subir.