

Traitements thermiques et trempabilité des aciers

1. Introduction

Par traitement thermique, on désigne toute opération faite à chaud et destinée à modifier la microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques. Pour les aciers d'amélioration, cet à dire, certains aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, certains traitements sont quasi obligatoires pour obtenir une performance optimale. Ces traitements sont la **trempe** et le **revenu**. Ils permettent de modifier et d'ajuster les propriétés mécaniques de l'acier telles que limite d'élasticité, résistance à la traction, ténacité, dureté et résilience aux besoins de l'utilisation. D'autres traitements, normalement désignés comme **recuits**, visent à amener le métal vers un équilibre structural et mécanique. Ils ont donc pour but de faire disparaître les états hors équilibre résultant des traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques.

Il existe plusieurs types de recuit selon l'histoire thermomécanique de l'acier et l'objectif final :

a) Recuit d'homogénéisation

Il s'applique aux aciers bruts de coulée pour lesquels la solidification a entraîné l'hétérogénéité de composition chimique (ségrégation). Il s'obtient en maintenant l'acier dans le domaine austénitique (solution solide γ) à une température aux alentours de 1000°C afin d'accélérer la diffusion du carbone et celle des autres éléments d'alliage. Une température plus élevée risque d'engendrer un grossissement de grain excessif.

b) Recuit de régénération ou normalisation

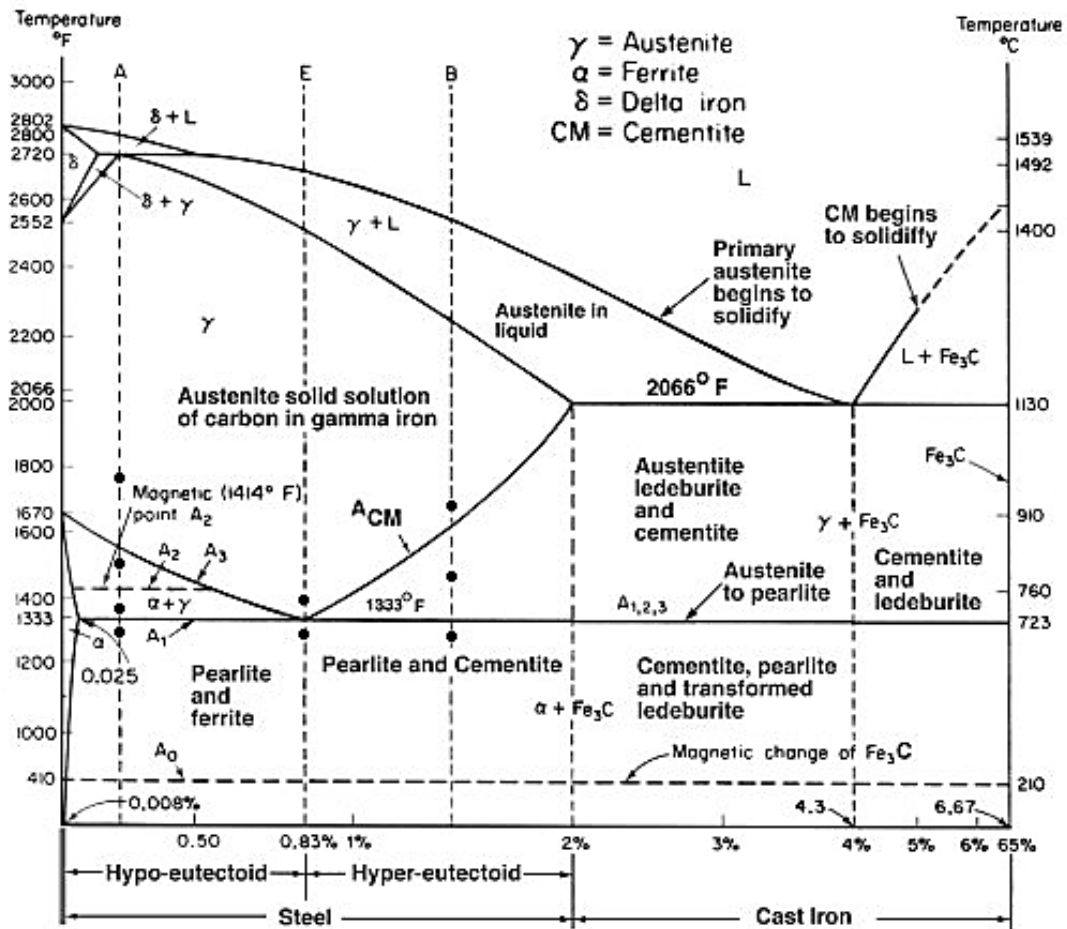
Il sert à affiner le grain (le rendre plus petit) pour les pièces qui ont subi un grossissement de grain à cause d'une exposition à une température élevée lors d'une opération de forgeage, moulage ou soudage. Le traitement s'effectue, pour une durée de quelques minutes, entre 50 à 100°C au-dessus de la limite inférieure du domaine austénitique (cf. Fig. 1). Dans l'industrie on pratique parfois aussi un traitement thermique cyclique autour de la ligne eutectoïde pour engendrer une structure encore plus fine grâce à plusieurs cycles de germination de ferrite et austénite. Le refroidissement (normalement à l'air) ne doit pas être trop lent pour éviter un grossissement de grain de la ferrite. L'état de normalisation est souvent l'état de livraison pour les aciers susceptibles d'être soumis à un traitement d'amélioration.

c) Recuit de détente

Il remet l'alliage en équilibre mécanique en diminuant les contraintes résiduelles (contraintes internes) résultant d'un travail à froid ou d'une opération de soudage. La température du traitement n'est pas liée à la transformation $\alpha - \gamma$ mais dépend fortement de l'acier.

d) Recuit de recristallisation

Il sert à diminuer la fragilité d'un métal écroui et à lui redonner sa capacité de déformation. Pour un acier ordinaire, ce traitement s'effectue en-dessus de 600°C.

Figure 1 : Diagramme d'équilibre Fe-Fe₃C

Il est clair qu'un des traitements mentionnés ci-dessus peut remédier à plusieurs défauts à la fois. Ceci est évident puisque les domaines de température des différents traitements se recouvrent partiellement (Fig. 2).

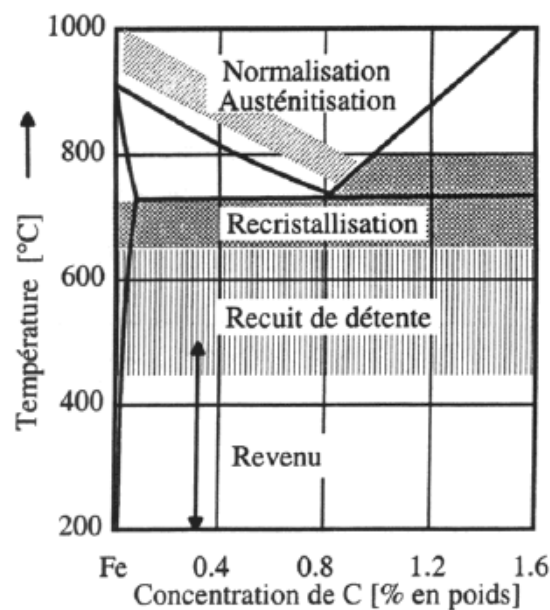


Figure 2: Domaines de températures d'austénitisation et d'autres traitements thermiques des aciers au carbone

Les objectifs de ce TP sont :

- Réaliser les traitements thermiques de trempe et revenu, sur des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés
- Mettre en évidence, par des mesures de dureté, l'influence :
 - Du milieu de trempe
 - Du temps de revenu
 - De la teneur en carbone
 - Des éléments d'alliages.
- Mettre en évidence, par un essai Jominy, l'influence de ces derniers est surtout dans leur capacité à engendrer une structure martensitique à des vitesses de refroidissement plus faibles

2. Le durcissement par trempe des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés

Le durcissement par trempe se déroule en trois étapes: l'austénitisation, la trempe et le revenu, qui sont décrits dans les paragraphes suivants.

2.1. L'austénitisation

L'austénitisation consiste d'abord à chauffer l'acier puis à le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés (30-50°C) au-dessus de son point de transformation. Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritiques (α , cc) en austénite (γ , cfc) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite.

2.2. La trempe

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de martensite ou de perlite fine. La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur en carbone de l'acier; elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C. La trempe s'effectue en général à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier (essai Jominy). Pour les aciers au carbone, la trempe se fait dans de l'eau à 20-40°C. En ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure. L'eau possède un coefficient de transfert thermique élevé, car sa chaleur latente de vaporisation et sa capacité thermique sont élevées. Il est évident que les couches d'oxyde adhérent à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempe l'augmente. Le refroidissement rapide par trempe ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du C et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable. L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit. Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion. Elle commence sur certains plans cristallographiques particuliers, appelés plans d'accolement, et avance par rabattement des atomes dans les plans voisins de même orientation. Un plan d'accolement est un plan cristallographique dans lequel la disposition des atomes est aussi identique que possible dans

l'ancienne et dans la nouvelle structure (minimum de distorsion). Lors de la transformation les atomes ne se déplacent que d'une distance nettement inférieure au paramètre de la maille. L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la transformation $\gamma - \alpha$. Pour mettre en évidence cette cinétique, on se sert des diagrammes TTT (diagrammes de transformation de l'austénite en **conditions isothermes**, Température - Temps - taux de Transformation, Fig. 3) et surtout des diagrammes TRC (diagrammes de Transformation en Refroidissement Continu, voir Fig. 4) dans le cas des trempes. La dureté dépend essentiellement de la vitesse de refroidissement, cf. une évolution typique montrée en Fig. 5.

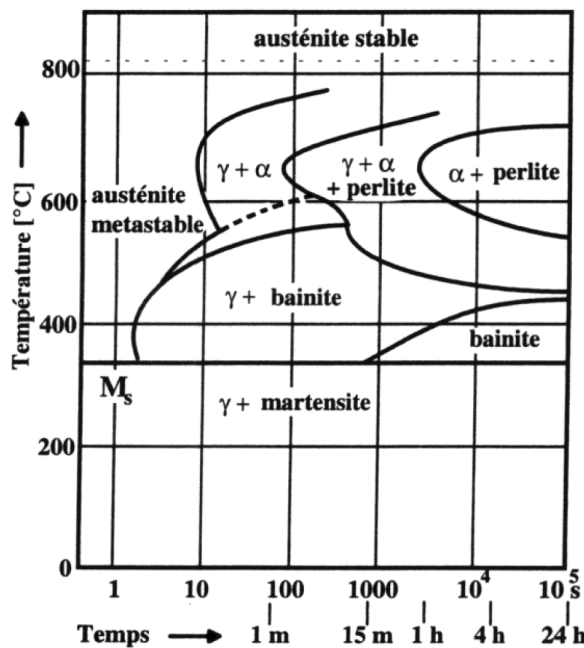


Figure 3 : Courbe TTT (acier faiblement allié 0,35 % C): Ce diagramme se lit en suivant une isotherme.

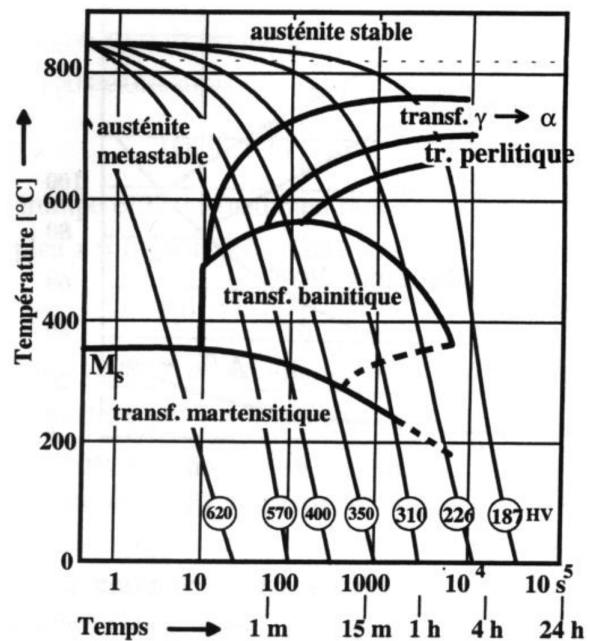


Figure 4 : Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement.

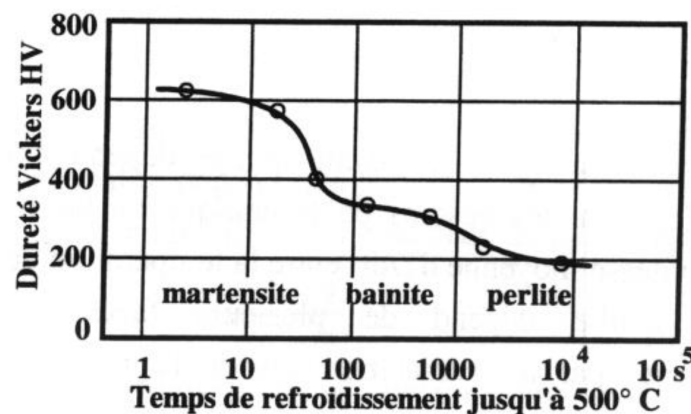


Figure 5 : Evolution typique de la dureté en fonction du temps pour atteindre 500°C lors du refroidissement pour un acier faiblement allié. L'axe du temps peut être compressé ou élargi selon la nuance d'alliage.

2.3. Le revenu

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe). D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques des microstructures martensitiques, et avec elles les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées. Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu de 30 min sont représentées dans le diagramme de revenu qui est normalement fourni par le fabricant de l'acier. Le diagramme montré en Fig. 6 correspond à celui d'un acier d'amélioration que l'on utilise pour la réalisation de pièces de construction fortement sollicitées (arbres, engrenages). En particulier il s'agit de l'acier 40NiCrMo6 qui a la composition : 0.4% C, 1.4% Ni, 0.8% Cr et 0.4% Mo.

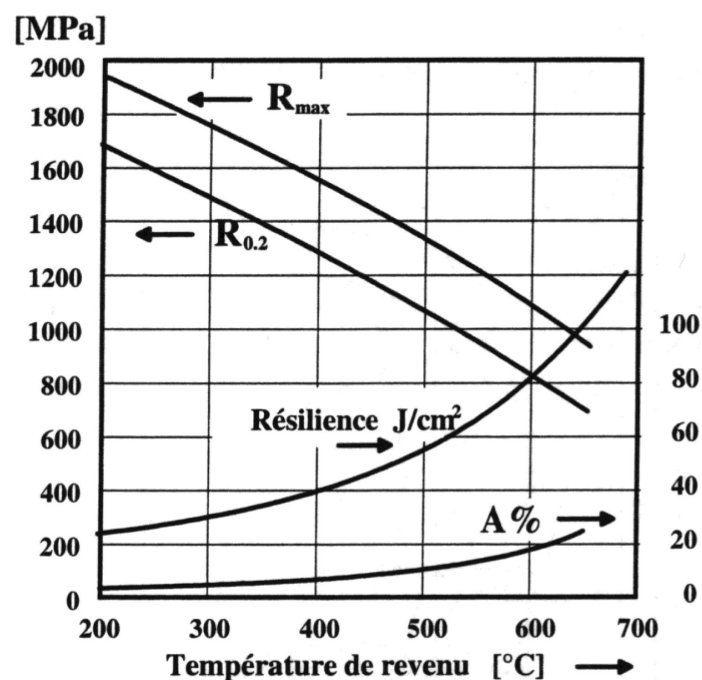


Figure 6: Diagramme de revenu de l'acier 40NiCrMo6 (Böhler V130, DIN 1.6565, AISI 4340). Évolution des propriétés en fonction de la température de revenu (température de trempe 840 °C).

3. Essai de trempabilité par trempe en bout (essai Jominy)

Les courbes de refroidissement en Fig. 7 montrent que 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 que sur une couche de 1 à 2 mm en dessous de la surface. On parle d'une mauvaise trempabilité.

Pour remédier à cette insuffisance des aciers au carbone, on ajoute un faible pourcentage (0.5 - 5%) d'autres éléments, notamment Mn, Ni, Cr, Mo, V, etc. (acier faiblement allié). A l'exception du Co et de l'Al, presque tous les éléments retardent la décomposition eutectoïde et par conséquent diminuent la vitesse de transformation. Ceci a comme effet de déplacer les courbes TRC vers la droite (temps plus élevé) et d'augmenter la trempabilité. Par exemple, pour l'acier de composition chimique Fe - 0.8% C - 0.6% Cr - 0.4% Mo le nez de la transformation se situe à 400 s.

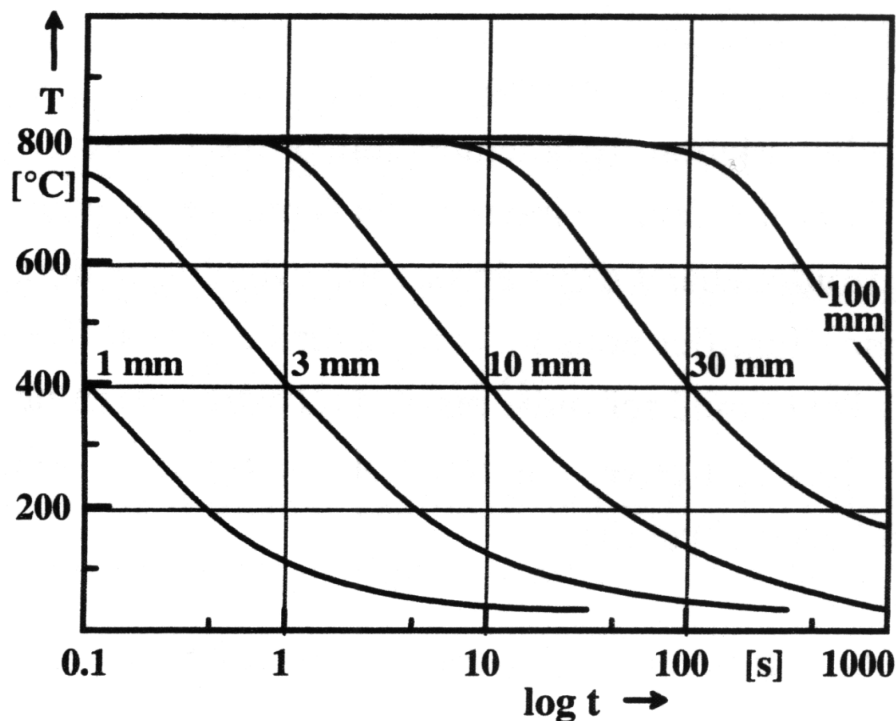


Figure 7: Courbe de refroidissement à différentes profondeurs x de l'éprouvette Jominy ($D = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

Un acier de bonne trempabilité ne permet pas seulement la réalisation d'une trempe à cœur mais permet d'effectuer la trempe dans l'huile au lieu de l'eau. La trempe à l'huile est un traitement moins brutal que la trempe à l'eau qui peut provoquer des fissures de trempe en raison des fortes contraintes thermomécaniques.

L'essai Jominy sert à mettre en évidence de façon simple et directe la trempabilité d'un acier. Par rapport aux diagrammes TRC, la méthode ne nécessite qu'une seule éprouvette par acier. Cette éprouvette en forme de barre d'une longueur de 100 mm et d'un diamètre de 25 mm, est d'abord chauffée et maintenue pendant 30 minutes à la température d'austénitisation. Après l'austénitisation, la barre est rapidement portée dans le dispositif de trempe (Fig. 8) où elle est suspendue verticalement au-dessus d'une buse débitant de l'eau froide à pression fixe.

Après le refroidissement, qui doit durer au moins 10 min, on retire l'éprouvette pour la refroidir complètement à l'eau et meuler (sans échauffement) un plat le long d'une génératrice de la surface cylindrique.

Pour évaluer l'effet des différentes vitesses de refroidissement, on détermine la dureté en fonction de la distance x mesurée à partir du bout refroidi (Fig. 8).

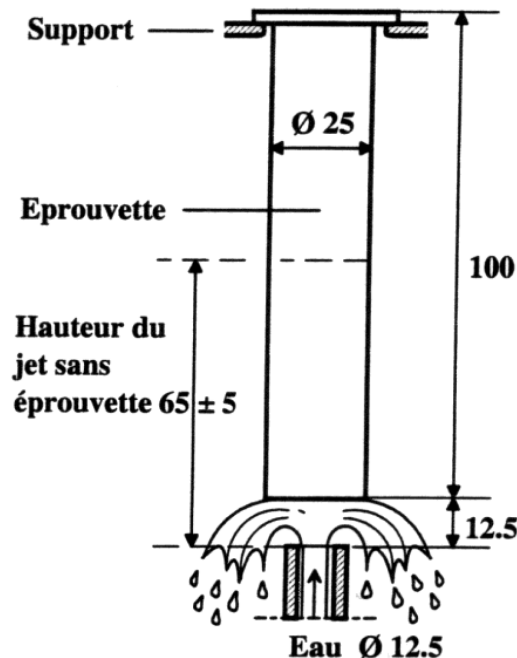


Figure 8: Appareil de trempe selon Jominy.

4. Manipulations à effectuer et éprouvettes

L'essai prévoit de démontrer les techniques des traitements thermiques et de la trempe des aciers, ainsi que leur effet modificateur sur les aciers au carbone et sur les aciers faiblement alliés.

Un jeu d'éprouvettes sous forme de rondelles ($\varnothing$ environ 15 mm) sert à mesurer la dureté après les différents traitements thermiques en fonction de la teneur en C et en éléments d'alliages, du milieu de trempe utilisé et du temps de revenu.

Les éprouvettes Jominy sont utilisées pour déterminer la trempabilité des différents aciers par l'intermédiaire de la courbe de dureté en fonction de la profondeur x mesurée par rapport à la surface trempée.

4.1. Traitements thermiques pour les rondelles

L'austénitisation, la trempe et le revenu sont à réaliser selon les indications ci-dessous. Les éprouvettes mises à disposition sont déjà normalisées (acheté en état recuit).

- Austénitisation : 30 min à 850 ou 900° C,
- Trempe : à l'eau ou à l'huile.
- Revenu : 550° C - 30 min + refroidissement à l'air

En prévision des divers traitements thermiques à effectuer, on dispose de plusieurs séries de rondelles d'un même acier qu'il convient de marquer selon leur état :

Tableau 1: Aciers à disposition pour les traitements thermiques

Acier (DIN)	Composition en % poids	Böhler	N° matière	T _{aust} [°C]	Trempe	Revenu
S235JRG2C (moyenne rondelles)	0.17% C, (0.2-0.5)%Mn	-	1.0122	900	eau huile air	
Ck45 (petite rondelles)	0.46%C-0.65%Mn, (Cr+Mo+Ni) < 0.63%	V945	1.1191	850	huile	x
X45NiCrMo4 (grande rondelles)	0.45C-0.25Si-0.4Mn- 1.3Cr-0.25Mo-4Ni	K600	1.2767	850	huile	x

4.2. Manipulation pour déterminer la trempabilité d'un acier

Un essai de Jominy est effectué sur des éprouvettes de l'acier donné ci-dessous. L'évolution de la dureté est mesurée sur un autre échantillon déjà usiné, en fonction de la distance à la surface de refroidissement.

Tableau 2 : Aciers à disposition pour l'essai Jominy.

Acier (DIN)	Composition en % poids	Böhler	N° matière	T _{aust} [°C]
30Mn5	0.31% C, 0.3% Si, 1.3%Mn	V930	1.1165	850

4.3. Installations mises à disposition

- 3 fours électriques (à 900, 850 et 550°C)
- Dispositif de trempe Jominy, bacs de trempe à l'eau et à l'huile
- Machine de dureté (HV)

5. Questions à répondre

- Quel est l'effet de la teneur en carbone sur la dureté ?
- Quel est l'effet du milieu de trempe sur la dureté ?
- Quel est l'effet du revenu sur la dureté ?
- Quel est l'effet des éléments d'alliages sur la dureté ?
- Dessinez la courbe de dureté en fonction de la profondeur pour l'essai Jominy

6. Bibliographie

[1] J.Philibert, A.Vignes, Y. Bréchet et P. Comrade, « Métallurgie du minerai au matériau », Masson 1998, p. 717.

[2] M. Massin, « Métallurgie Pratique pour Mécaniciens », tome 1, Pyc édition 1982, p 87-162.

[3] H-J. Bargel et G. Schultze (ed.), « Werkstoffkunde », Springer Verlag 2000.