

Traitements thermiques et trempabilité des aciers

1. Introduction

Un alliage de fer contenant moins de 2 %pds de carbone est par définition un **acier**. Si l'alliage contient plus de 2 %pds de carbone, on le nomme alors une **fonte**. L'élément C étant un atome interstitiel dans le fer, il exerce une forte influence sur les propriétés de l'alliage, comme vous le verrez dans ce TP. Cette influence peut être directe, par la modification des phases d'équilibre de l'alliage, mais aussi indirecte car le carbone peut fortement influencer la cinétique, c'est à dire la dépendance vitesse de formation, voire même de la nature, des phases qui apparaissent pendant ou après un changement de température. Des traitements thermiques adaptés à la composition des alliages sont ainsi généralement appliqués afin de modifier leur microstructure et donc ajuster leurs propriétés à l'application pour laquelle ils sont destinés. Nous verrons ici la mise en pratique de traitements thermiques de base caractéristiques des aciers trempés, et le ferons par le biais d'un essai inventé pour quantifier certains aspects de leurs traitements thermiques.

Ce TP a comme objectifs de :

- Réaliser des traitements thermiques de recuit et de revenu, sur des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés
- Mettre en évidence, par des mesures de dureté, l'influence :
 - De la vitesse de refroidissement,
 - Du revenu,
 - De la teneur en carbone,
 - Des éléments d'alliages.
- Mettre en évidence, par un essai Jominy, l'influence de la vitesse de refroidissement et donc de la taille d'une pièce sur la capacité des aciers à engendrer une structure martensitique

2. Les aciers

Dans cette section, nous vous présentons un petit rappel du diagramme de phases des aciers (voir Fig. 1). Pour plus d'informations, n'hésitez pas à vous référer au chapitre IV du polycopié du cours MSE-236 Métaux & Alliages. L'élément principal des aciers est bien évidemment le fer, qui existe sous deux formes cristallines distinctes en dessous de son point de fusion. La première forme cristalline en parant de l'ambiante est une phase cubique centrée (CC), qui est stable en tant que ferrite α depuis la température ambiante jusqu'à 912 °C et aussi en tant que ferrite δ également de 1394 °C jusqu'à son point de fusion de 1530 °C. L'autre forme cristalline, stable entre 912 et 1394 °C (1675 et 2540 °F), est la forme cubique à faces centrées (CFC), connue sous le nom d'austénite ou de phase γ .

Les aciers contiennent également un second élément : le carbone (en quantités inférieures à 2 pds%). Le carbone modifie profondément les relations de phase, la microstructure et les propriétés des aciers. En général, la teneur en carbone reste faible (au plus à quelques dixièmes de % par poids) dans les aciers qui nécessitent une ductilité élevée, une grande ténacité et une bonne soudabilité, mais elle est maintenue à des niveaux plus élevés dans les aciers qui nécessitent une résistance élevée, une grande dureté, une résistance à la fatigue et une résistance à l'usure.

La figure 1 montre le diagramme de phase fer-carbone et les changements que le carbone induit dans les équilibres de phase du fer pur. Le carbone est un stabilisateur de l'austénite : il élargit sa plage de

température de stabilité. Sa solubilité est beaucoup plus élevée dans l'austénite (un maximum de 2,11 % en poids en équilibre avec la cémentite à 1148 °C) que dans la ferrite (un maximum de 0,0218 % en poids en équilibre avec la cémentite à 727 °C). La solubilité maximale du carbone dans la ferrite et l'austénite est fonction de la température ; lorsque les atomes de carbone ne peuvent plus être logés dans les sites interstitiels octaédriques entre les atomes de fer de la maille cubique centrée, une nouvelle phase capable de loger davantage d'atomes de carbone dans sa structure cristalline se forme. Cette phase est un composé stœchiométrique, le carbure de fer (Fe_3C) qui est appelé cémentite et présente une structure cristalline orthorhombique. La formation de cémentite et la solubilité du carbone dans l'austénite et la ferrite en fonction de la température, contrôlées par l'alliage et le traitement, expliquent dans une grande mesure la grande variété de microstructures et de propriétés produites dans les aciers

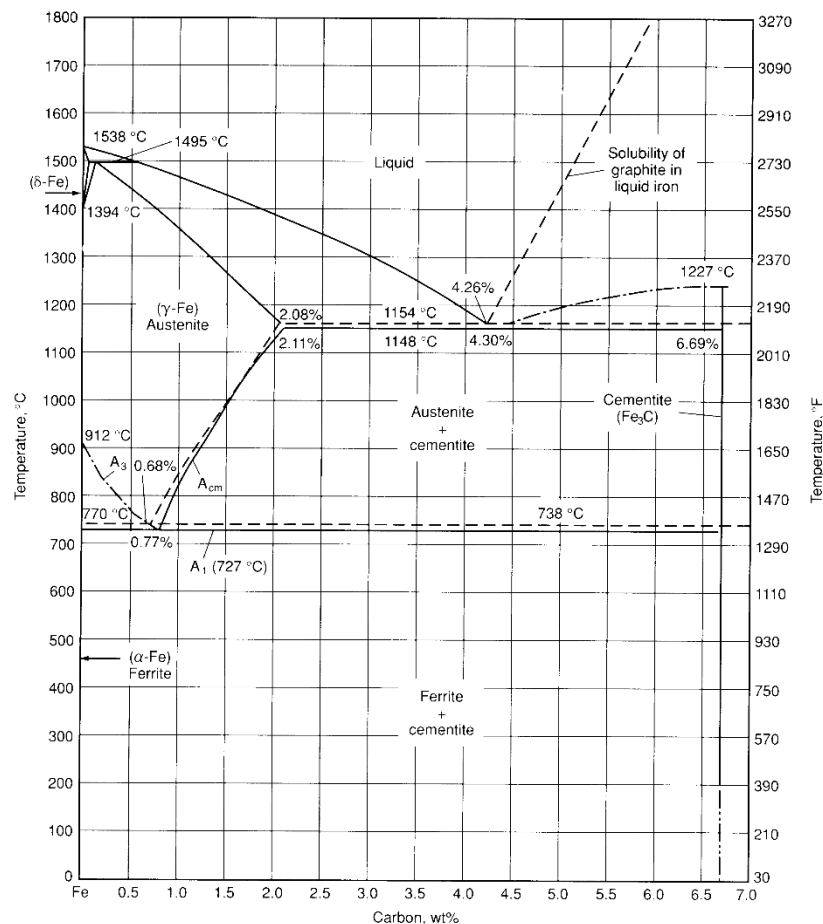


Figure 1 : Diagramme de phase Fe-C jusqu'à 6.67 wt% C. Les lignes solides représentent le diagramme Fe-Fe₃C (diagramme métastable); les lignes pointillées représentent le diagramme Fe-Graphite (diagramme stable). Source : G. Krauss, *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Steel*, in *Metals Handbook Desk Edition*, H.E. Boyer and T.L. Gall, Ed., American Society for Metals, 1985, p 28-2, to 28-10.

3. La transformation martensitique

La martensite est la phase qui produit parmi les duretés et les résistances les plus élevées dans les aciers. C'est une phase métastable se forme à partir de l'austénite uniquement lors de refroidissements à des vitesses suffisamment rapides pour empêcher la diffusion des atomes vers leur état d'équilibre et donc empêcher la transformation de l'austénite en ferrite et/ou perlite comme décrit par le diagramme de phase, ou alternativement en bainite. La transformation martensitique se

produit par distorsion de la maille cristallographique de l'austénite (voir Fig. 2) ; pendant cette transformation ni les atomes de fer ni les atomes de carbone ont le temps de diffuser, ce qui a pour conséquence que la maille produite est un hybride entre cubique faces centrées et cubique centré, les atomes de carbone empêchant l'affaissement de la maille cubique face centrée.

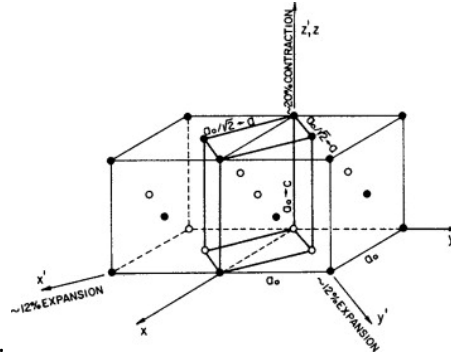


Figure 2: Distorsion de la structure cristalline de l'austénite pour obtenir de la martensite. Source: C.M. WAYMAN, H.K.D.H. BHADSHIA, *Physical Metallurgy (Fourth Edition)*, North-Holland, 1996, Pages 1507-1554.

La transformation martensitique commence à se former à une température critique, définie comme la température de départ de la martensite (M_s , « martensite start ») (voir Fig. 3 et 4). Cette température varie avec la teneur en éléments d'alliage ; en particulier elle diminue avec l'augmentation de la teneur en carbone. Elle est accomplie par la germination et la croissance de nombreux cristaux dont la forme est dictée par des distorsions et contraintes dans les mailles cristallographiques de la martensite et de l'austénite au sein de laquelle elle s'est formée.

4. Le durcissement des aciers

Comme nous venons de le voir dans la section 3, la phase plus dure dans les aciers est la martensite et elle s'obtient en refroidissant l'acier austénitique à une vitesse tellement rapide qu'elle empêche toute autre transformation pouvant se produire pour former des phases plus stables que la martensite. Le traitement thermique de durcissement va donc se dérouler en trois étapes : l'austénitisation, la trempe et potentiellement le revenu, qui sont décrites dans les paragraphes suivants.

4.1. L'austénitisation

L'austénitisation consiste à homogénéiser la microstructure de l'acier pour obtenir de la phase austénitique (γ , cfc). L'acier est pour cela chauffé et maintenu dans son domaine austénitique (voir Fig. 1). La température et le temps d'austénitisation vont dépendre de la teneur en carbone de l'acier.

4.2. La trempe

La trempe consiste en un refroidissement rapide de l'acier austénitisé afin d'empêcher la diffusion des atomes pour former d'autres phases plus stables que la martensite (voir Fig. 2). La trempe s'effectue en général à l'eau, mais peut aussi se réaliser à l'huile ou à l'air en fonction de la vitesse de refroidissement requise.

L'effet d'une trempe sur un acier est très fortement influencé 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 influence sur la cinétique de formation des

phases, on se sert des diagrammes Temps-Température-Transformations (TTT) (voir Fig. 3) et en pratique surtout des diagrammes Transformation en Refroidissement Continu (TRC) (voir Fig. 4). Pour plus d'informations par rapport à ces diagrammes, n'hésitez pas à vous référer au chapitre IV du polycopié du cours MSE-236 Métaux & Alliages (voir p. 207).

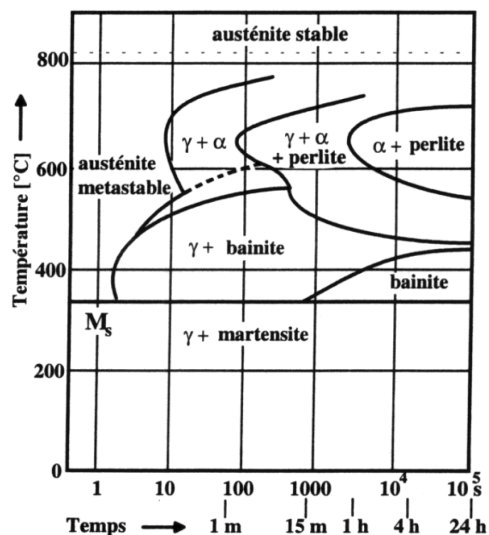


Figure 3 : Courbe TTT (acier faiblement allié 0,35 % C): Ce diagramme se lit en suivant une isotherme.

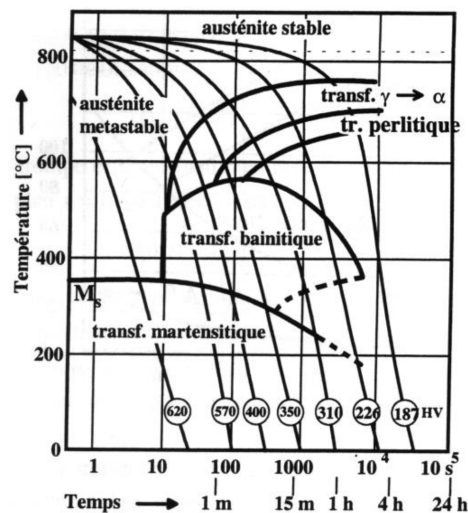


Figure 4 : Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement.

4.3. Le revenu

Un acier trempé est constitué de phase martensitique et est donc très dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer pendant un certain temps une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation martensitique, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer ou de réduire les contraintes résiduelles provenant de la trempe, puis aux températures plus élevées de transformer la martensite de façon à en augmenter la ductilité et la ténacité, généralement au détriment de la dureté et de la résistance de l'alliage.

En chauffant la pièce, on permet aux atomes de diffuser et donc de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite (voir Fig. 1). L'augmentation de la température permet la diffusion des atomes de carbone en dehors des mailles de martensite, engendrant la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, d'autres carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement pour tendre vers la maille cubique centrée 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 ainsi largement relâchées. Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu de 30 min sont représentées dans les données qui sont fournies par le fabricant de l'acier.

5. 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 plus on s'éloigne de la surface refroidie 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.

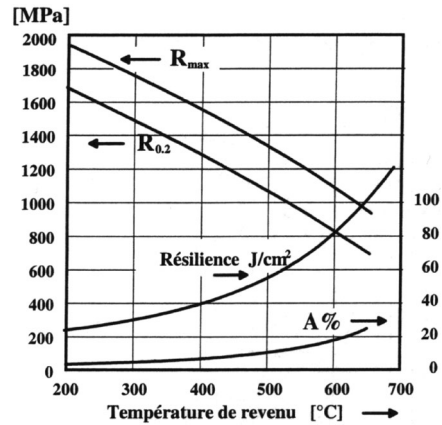


Figure 5: Diagramme de revenu de l'acier 40NiCrMo6 (Böhler V130, DIN 1.6565, AISI 4340). Évolution des propriétés en fonction de la température de revenu (température de trempe 840 °C).

Pour remédier à cette faible trempabilité des aciers au carbone, on ajoute un faible pourcentage (0.5 - 5%) d'autres éléments, comme Mn, Ni, Cr, Mo, ou V (l'acier est alors dit 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 donc d'augmenter la trempabilité de l'acier. 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 au lieu de quelques secondes sans la présence de ces deux éléments d'alliage autres que le carbone.

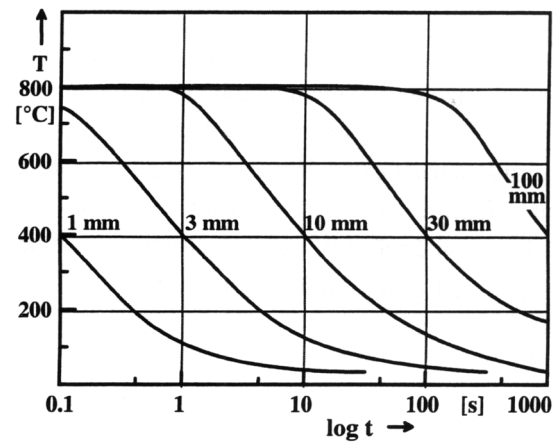


Figure 5: Courbe de refroidissement à différentes profondeurs x de l'éprouvette Jominy ($D = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

Un acier de bonne trempabilité peut permettre d'effectuer la trempe dans l'huile au lieu de l'eau tout en formant la martensite à une profondeur suffisante. La trempe à l'huile est un traitement moins brutal que la trempe à l'eau qui peut provoquer des fissures en raison des fortes contraintes thermomécaniques qui résultent des gradients de température et de cinétique de transformation de phase entre la surface et le cœur des pièces trempées.

L'essai Jominy sert à mettre en évidence et quantifier de façon simple, reproductible 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 (voir Fig. 1). Après l'austénitisation, la barre est rapidement transportée et insérée dans le dispositif

de trempe (voir Fig. 8) où elle est suspendue verticalement au-dessus d'une buse débitant de l'eau froide à pression fixe sur une extrémité de l'éprouvette.

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 méplat 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 (voir Fig. 8).

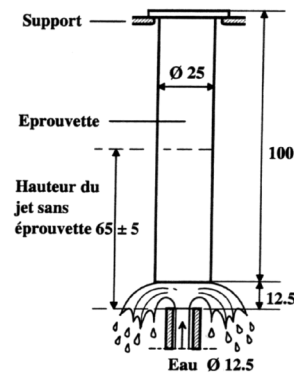


Figure 6: Appareil de trempe selon Jominy.

6. Partie expérimentale

Le TP prévoit de démontrer l'effet des traitements thermiques et de la trempe sur la dureté des aciers au carbone et faiblement alliés. Pour ce faire, 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 carbone, la teneur en autres éléments d'alliages, la vitesse de refroidissement ainsi que du revenu.

Les éprouvettes Jominy sont ensuite utilisées pour quantifier la trempabilité d'un acier par l'intermédiaire de la courbe de dureté en fonction de la profondeur x mesurée par rapport à la surface trempée.

6.1. Traitements thermiques pour les rondelles

L'austénitisation, la trempe et le revenu sont à réaliser selon les indications ci-dessous (Voir Tab. 1). Les éprouvettes mises à disposition sont déjà normalisées (achetées en état recuit).

Tableau 1: Aciers à disposition pour les traitements thermiques

Acier (DIN)	Composition en % poids	Böhler	N° matière	T _{aust} [°C]	Trempe	Revenu
S235 (rondelles moyenne)	0.17% C, (0.2-0.5)%Mn	-	1.0122	40 min à 900 °C	eau huile air	Non
CK45 (rondelles petites)	0.46%C-0.65%Mn, (Cr+Mo+Ni) < 0.63%	V945	1.1191	40 min à 850 °C	huile	Oui
X45NiCrMo4 (rondelles grandes)	0.45C-0.25Si-0.4Mn- 1.3Cr-0.25Mo-4Ni	K600	1.2767	40 min à 850 °C	huile	Oui

6.2. Manipulation pour déterminer la trempabilité d'un acier

Un essai de Jominy est effectué sur une éprouvette de l'acier donné dans le Tableau 2. L'évolution de la dureté est mesurée sur un autre échantillon déjà usiné mais qui a subi le même traitement, 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

7. Questions auxquelles il faut répondre

- Quel est l'effet de la teneur en carbone sur la dureté ?
- Quel est l'effet de la vitesse de refroidissement et donc 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

8. 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.