

Aciers pour traitements thermiques

Propriétés et guide de choix

par **Guy MURRY**

*Ingénieur de l'École nationale supérieure d'électrochimie et d'électrometallurgie
de Grenoble, Docteur-ingénieur
Ingénieur-conseil métallurgie et aciers
Ancien Directeur de l'Office technique pour l'utilisation de l'acier (OTUA)*

1. Généralités.....	M 4 530 – 2
2. Propriétés.....	— 2
2.1 Capacité de durcissement.....	— 2
2.2 Trempabilité.....	— 3
2.3 Carbone, azote et éléments d'alliage.....	— 3
2.3.1 Carbone.....	— 3
2.3.2 Azote.....	— 3
2.3.3 Éléments d'alliage en solution solide.....	— 4
2.3.4 Bore.....	— 5
2.4 Caractéristiques de résistance et de ductilité.....	— 5
3. Choix d'un acier pour traitement thermique.....	— 6
3.1 Paramètres du choix et leur prise en compte.....	— 6
3.1.1 Température de service.....	— 6
3.1.2 Paramètres du durcissement.....	— 7
3.1.3 Localisation éventuelle des sollicitations mécaniques.....	— 7
3.1.4 Allongement à rupture et résilience.....	— 7
3.1.5 Paramètres de faisabilité du traitement thermique.....	— 7
3.2 Choix final.....	— 8
3.3 Aides au choix.....	— 8
Pour en savoir plus.....	Doc. M 4 533

Les aciers spéciaux de construction mécanique pour traitements thermiques sont essentiellement des aciers destinés aux mécaniciens qui utilisent le traitement thermique final pour donner à ces aciers des propriétés d'emploi très performantes, tout en profitant des possibilités offertes par un ou plusieurs traitements thermiques intermédiaires pour les mettre en œuvre (par formage, usinage, etc.) dans les conditions les moins pénalisantes et les plus économiques. Ce faisant, les mécaniciens mettent à profit la remarquable facilité d'adaptation qu'offrent les aciers, facilité qui découle de l'ampleur des variations de leurs propriétés mécaniques en fonction des divers états structuraux que l'on peut leur conférer par traitement thermique.

L'éventail des potentialités offertes par les aciers spéciaux de construction pour traitements thermiques (au sens large du terme) est très vaste ; il sera donc impératif de bien faire son choix, en prenant en compte tous les paramètres.

L'étude complète du sujet comprend les articles :

- **M 4 530 – Aciers pour traitements thermiques. Propriétés et guide de choix (le présent article) ;**
- **M 4 531 – Aciers pour traitements thermiques. Normalisation ;**
- **M 4 532 – Aciers pour traitements thermiques. Mise en œuvre ;**
- **Doc. M 4 533 – Aciers pour traitements thermiques.**

1. Généralités

La figure 1 permet de quantifier les possibilités offertes par les aciers à travers des courbes précisant l'évolution de la résistance à la traction en fonction de la teneur en carbone et après différents traitements thermiques.

Après **trempe et revenu** le domaine utilisable en pratique est compris entre :

- une limite inférieure qui correspond à un revenu à haute température ne conduisant pas à des performances de résistance très élevées (sauf si l'acier contient des éléments d'alliage carburigènes), mais assurant un haut niveau des caractéristiques de ductilité donc de sécurité ;

- une limite supérieure qui correspond à un revenu de détente (180 à 220 °C) qui permet de conserver de hautes caractéristiques de résistance, mais conduit à une ductilité limitée qui exige que des précautions soient prises pour limiter le risque de rupture brutale.

Après **adoucissement** le domaine utilisable en pratique est compris entre :

- une limite inférieure qui correspond à l'adoucissement maximal (avec globulisation des carbures) qui favorise la mise en forme par déformation à froid ;

- une limite supérieure qui correspond aux états préférables (ferritoperlitiques fins) pour l'usinage.

Mais il est judicieux ici, pour tenir compte des progrès réalisés, d'élargir le domaine des traitements thermiques en prenant en compte les possibilités offertes par les **traitements thermomécaniques** qui, en couplant déformation plastique à chaud et gestion des refroidissements, permettent d'accéder à des solutions intéressantes par leur efficacité et leur économie. Pour rester dans le domaine des fabrications mécaniques, nous nous limiterons aux solutions accessibles dans le cadre de la forge à chaud, c'est-à-dire aux résultats de ce que l'on appelle souvent les **traitements dans la chaude de forge** qui peuvent s'appliquer aux aciers classiques de construction mécanique, mais aussi à une classe spéciale d'aciers microalliés dits à *dispersoïdes* [M 4 525].

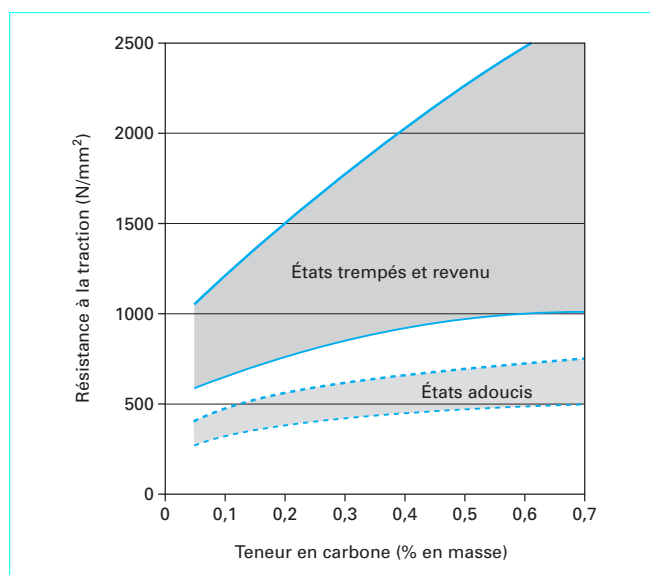


Figure 1 – Description schématique des variations de la résistance à la traction des aciers avec leur teneur en carbone et leur traitements thermiques.

Enfin, à ces possibilités, on peut ajouter encore celles qui permettent de conférer, à des zones de surface de pièces en acier, des propriétés très particulières par modification directe de leur composition chimique ; il s'agit ici de toutes les solutions apportées par les **traitements thermochimiques** qui justifient parfois, pour leur meilleure exploitation, l'emploi de nuances d'aciers spécifiques, les propriétés d'une pièce ainsi traitée dépendant en effet à la fois de l'acier de base, de sa structure et des modifications réalisées en peau.

■ Que demande-t-on à ces aciers ?

Le mécanicien demande, tout d'abord et essentiellement, aux aciers spéciaux de construction mécanique pour traitements thermiques, d'être capables d'acquiescer, par traitement thermique ou/et thermochimique industriel, les propriétés d'emploi qu'exige la pièce qu'il veut réaliser.

Comme on le verra § 3, lorsque sera évoqué le problème du choix de la nuance, cette exigence conduit à la recherche d'un judicieux compromis entre les niveaux des caractéristiques de résistance et ceux des caractéristiques de ductilité, pour assurer simultanément la performance et la sécurité en service.

Les **caractéristiques de résistance** dépendent des deux propriétés fondamentales des aciers de traitements thermiques :

- la capacité de durcissement qui détermine les niveaux que pourront atteindre ces caractéristiques ;
- la trempabilité qui conditionne les possibilités pratiques d'obtention de ces niveaux potentiels.

Le niveau des **caractéristiques de ductilité** dépend :

- d'une part, de l'habituelle compétition entre résistance et ductilité ; quand l'une augmente, l'autre diminue ;
- d'autre part, de divers facteurs métallurgiques tels que l'état inclusionnaire et la grosseur de grain.

Mais le mécanicien demande aussi aux aciers de construction mécanique pour traitements thermiques de se prêter à leur mise en œuvre ; les particularités liées à cette exigence complémentaire seront examinées dans l'article [M 4 532] traitant la mise en œuvre de ces aciers.

2. Propriétés

2.1 Capacité de durcissement

Elle correspond, selon la norme NF EN 10052, à la définition suivante.

La **capacité de durcissement** est la valeur maximale de la dureté que l'on peut obtenir par un traitement de durcissement par trempe dans des conditions idéales.

Ces conditions idéales sont telles qu'elles permettent l'obtention d'une structure totalement martensitique (donc sans ferrite, perlite, bainite, mais aussi sans austénite résiduelle).

Cette capacité de durcissement ne dépend, pratiquement, que de la teneur en carbone de l'acier et, si l'on a recours à la nitruration ou à la carbonitruration, de sa teneur en azote. En dehors de tout apport volontaire d'azote, elle est quantitativement définie par la courbe 100 % martensite à l'état brut de trempe de la figure 2, dans la mesure où tout le carbone de l'acier a été mis en solution dans l'austénite avant la trempe. Il s'agit d'une caractéristique intrinsèque de l'acier dont la valeur est connue dès qu'est précisée la teneur en carbone soluble.

La figure 1 montre, par ailleurs, que l'influence de la capacité de durcissement se fait encore sentir après revenu.

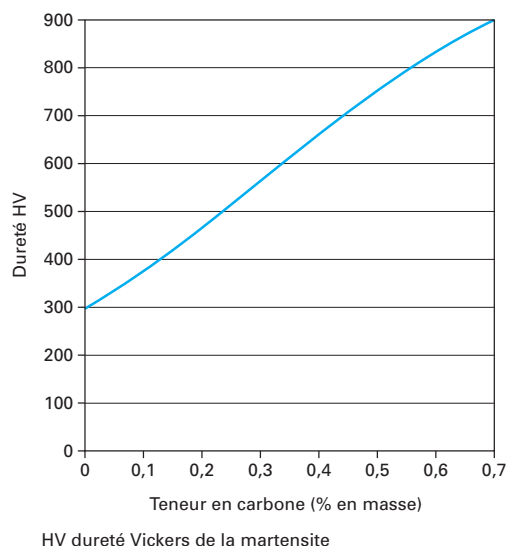


Figure 2 – Dureté des martensites en fonction de leur teneur en carbone

On peut noter au passage qu'une opération de cémentation, qui consiste à augmenter la teneur en carbone au voisinage de la surface des pièces, accroît dans cette zone la capacité de durcissement de l'acier.

2.2 Trempabilité

Selon la norme NF EN 10052, sa définition est la suivante.

La **trempabilité** correspond à l'aptitude d'un acier à donner lieu aux transformations martensitique et/ou bainitique.

La trempabilité caractérise donc les possibilités d'obtention du durcissement maximal (donc d'exploitation de la capacité de durcissement) et cela eu égard aux conditions technologiques dans lesquelles la transformation martensitique pourra être réalisée.

Un acier est dit d'autant plus *trempant* que :

- en conditions isothermes, les temps d'incubation avant le début des transformations ferritoperlitique et bainitique sont plus longs ;
- en refroidissement continu, une transformation totalement martensitique peut être obtenue avec un refroidissement plus lent.

Cette trempabilité dépend essentiellement (cf. article [M 1 115] *Transformations dans les aciers* :

- de la composition chimique de l'acier ;
- des conditions d'austénitisation (mise en solution des carbures et grosseur des grains d'austénite).

Elle peut être estimée à partir des diagrammes de transformation et des courbes Jominy (cf. article [M 1 115]), mais, dans ce dernier cas, il faut tenir compte de la contribution de la capacité de durcissement qui déplace verticalement les courbes.

L'utilisation de cette notion, sur le plan pratique, conduit à prendre en compte les possibilités de refroidissement d'une pièce et donc :

- d'une part, de sa taille et de sa forme ;
- d'autre part, de l'efficacité des moyens de refroidissement que l'on peut utiliser.

Avec la taille et la forme des pièces, on retrouve la notion d'effet de masse lié à la conductivité thermique des aciers et qui implique que les différences relatives des conditions de refroidissement entre peau et cœur sont d'autant plus grandes que la section est plus forte et que le refroidissement est plus énergétique.

L'efficacité des moyens de refroidissement fait intervenir leur pouvoir refroidissant, propriété difficile à quantifier ; on se réfère parfois à la **sévérité de trempe**, notion sommaire, mais qui permet des comparaisons significatives et utiles.

Toutes ces notions ont été examinées en détail dans les articles [M 1 125], [M 1 126] et [M 1 127] *Traitements thermiques dans la masse des aciers* dans le présent traité.

On retiendra que, **quand on passe d'une nuance d'acier à une autre nuance plus trempante** (c'est-à-dire plus alliée), on peut :

- refroidir moins énergiquement une pièce de dimensions données pour engendrer la transformation martensitique à cœur ;
- obtenir par trempe dans un milieu donné une transformation martensitique à cœur de pièces de plus forte section.

2.3 Carbone, azote et éléments d'alliage

Les aciers contiennent du carbone, qui assure le durcissement, et des éléments d'alliage, qui apportent la trempabilité, et éventuellement, s'ils sont carburigènes, un durcissement secondaire. Il est donc utile de rappeler plus en détail ce que peut être l'influence de chacune de ces diverses additions.

2.3.1 Carbone

Élément fondamental, il apporte la capacité de durcissement en participant à la précipitation de carbure de fer Fe_3C ou M_3C (M étant un élément d'alliage Cr, Mn..., en substitution partielle du fer) ou de carbure d'éléments d'alliage carburigènes (tels V, Mo, W...). Il est aussi susceptible de modifier la trempabilité par effet de synergie avec les éléments d'alliage (cf. article [M 1 115] *Transformations dans les aciers*). Cette influence est d'autant plus forte que l'acier est plus riche en éléments d'alliage, elle peut devenir nulle quand ces derniers sont absents.

2.3.2 Azote

Il a un rôle semblable, mais cependant moins important que celui du carbone. A l'état d'élément résiduel (non ajouté volontairement) et en présence d'aluminium, il intervient dans la formation de précipités de nitrure d'aluminium qui vont contrôler la grosseur des grains de l'austénite. De la sorte, aluminium et azote vont avoir une influence conjointe, en empêchant le grossissement des grains γ (en dessous de 1 000 à 1 050 °C) et en diminuant donc, de ce fait, la trempabilité de l'acier dans une mesure qui est loin d'être négligeable. Ajouté volontairement (nitruration et carbonitruration), l'azote contribue au durcissement :

- par effet de solution solide d'insertion ;
- par précipitation de nitrure de fer γ' (voisin de Fe_4N) ou ε (compris entre Fe_2N et Fe_3N) ;
- par précipitation de nitrure d'éléments d'alliage tels Cr, Mn, Mo, V, Ti...

2.3.3 Éléments d'alliage en solution solide

Les éléments susceptibles d'entrer en solution solide de substitution dans le fer constituent ce que l'on appelle communément les *éléments d'alliage* (Mn, Si, Ni, Cr, Mo, V, W...). Ils augmentent tous la trempabilité de l'acier à l'exception d'un seul d'entre eux : le cobalt, dont l'addition entraîne une diminution de celle-ci.

■ **L'effet sur la trempabilité** croît bien entendu avec la quantité d'éléments mise en solution dans l'austénite, mais aussi avec l'identité de chaque élément ; ainsi, à des teneurs semblables, le manganèse, le chrome, le molybdène apportent une forte augmentation de la trempabilité alors que le nickel, le cuivre et le silicium n'ont qu'une influence plus limitée.

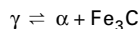
Mais cette modification de la trempabilité peut revêtir des aspects différents selon l'élément d'alliage considéré ; ainsi :

— certains éléments tels le chrome, le nickel, ne feront que translater les courbes caractérisant la trempabilité vers des domaines correspondant à des refroidissements plus lents sans les déformer sensiblement ;

— d'autres éléments tels le manganèse ou le molybdène vont aussi déplacer ces courbes dans la même direction, mais en les déformant. Ils repoussent plus vers la droite les domaines dans lesquels se forment la ferrite et la perlite que le domaine où se développe la transformation bainitique ; ils élargissent donc le domaine bainitique.

Dans le premier des cas évoqués ci-dessus (Cr, Ni), la courbe Jominy [M 1 115] *Transformations dans les aciers*, comme la courbe $HV = f(\Delta t)$, se déplace vers des distances [durées] plus grandes en conservant la même pente, tandis que dans le deuxième cas (Mn, Mo), le déplacement vers de plus grandes distances [durées] sera accompagné par une diminution de la pente de la courbe.

■ Mais on doit noter ici que les éléments d'alliage engendrent des **modifications de l'équilibre** :



Au premier chef, ils modifient les limites du domaine de stabilité de l'austénite et on doit distinguer :

— les **éléments gammagènes**, tels Ni et Mn, qui augmentent la surface de ce domaine en abaissant les points A_{c1} et A_{c3} ;

— les **éléments alphagènes** parmi lesquels on trouve Si, Cr, Mo, V, W, Ti qui diminuent cette surface en relevant les points A_{c1} et A_{c3} .

Lorsque les **teneurs en éléments d'alliage sont peu élevées**, il est possible de décrire, à l'aide de formules assez simples, la relation qui lie la température de certains points de transformation à la composition chimique de l'acier [1] :

— A_{c3} , température (°C) à laquelle la ferrite achève de se transformer en austénite au cours du chauffage en conditions proches de l'équilibre :

$$A_{c3} = 910 - 203 \sqrt{C\%} - 15,2(Ni\%) + 44,7(Si\%) + 104(V\%) + 31,5(Mo\%) + 13,1(W\%)$$

— A_{c1} , température (°C) à laquelle l'austénite commence à se former au cours du chauffage en conditions proches de l'équilibre :

$$A_{c1} = 723 - 10,7(Mn\%) - 16,9(Ni\%) + 29,1(Si\%) + 16,9(Cr\%) + 6,4(W\%)$$

— M_s , température (°C) à laquelle l'austénite commence à se transformer en martensite au cours du refroidissement :

$$M_s = 512 - 453(C\%) + 217(C\%)^2 - 71,5(C\%)(Mn\%) - 67,6(C\%)(Cr\%) - 16,9(Ni\%) + 15(Cr\%) - 9,5(Mo\%)$$

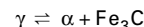
ou, sous forme simplifiée :

$$M_s = 539 - 423(C\%) - 30,4(Mn\%) - 12,1(Cr\%) - 17,7(Ni\%) - 7,5(Mo\%)$$

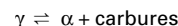
ou, selon d'autres auteurs [2] :

$$M_s = 561 - 474(C\%) + -33(Mn\%) - 17(Cr\%) - 17(Ni\%) - 21(Mo\%)$$

Les **éléments d'alliage carburigènes**, qui ont pour le carbone une affinité supérieure à celle du fer, modifient l'équilibre :



qui devient :



Ces éléments (Cr, Mo, V, W...) participent en effet à la précipitation du carbone sous forme de carbures différents de la cémentite. Ainsi pourront être présents des carbures contenant des proportions variables de fer et d'éléments d'alliage (M_3C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$, M_6C) et/ou des carbures d'éléments d'alliage (Mo_2C , V_4C_3 , W_2C ...). Cette précipitation peut se faire au cours de la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ lorsque celle-ci se développe à haute température. Elle est alors susceptible, si les précipités sont assez fins, d'engendrer un durcissement supplémentaire qui modifie les évolutions de la dureté lorsque le refroidissement devient moins sévère. Les courbes Jominy et $HV = f(\Delta t)$ peuvent alors présenter une pente réduite, un palier, voire une remontée vers un maximum relatif suivant l'ampleur du phénomène.

Par ailleurs, ces éléments carburigènes en modifiant les conditions d'équilibre engendrent, après revenu à une température supérieure à 550 °C, une modification de la composition des carbures (par échange du carbone entre la cémentite et ces éléments) qui provoque un durcissement supplémentaire (le **durcissement secondaire**) et donc, aussi, une baisse des caractéristiques de ductilité. Il pourra alors être nécessaire de rétablir l'équilibre recherché entre ces dernières et les caractéristiques de résistance en augmentant la température de revenu.

■ Les éléments d'alliage qui restent en solution solide peuvent engendrer un **durcissement de la ferrite** variable avec chaque élément. Mathon [3] a proposé d'exprimer ce durcissement à l'aide de la formule :

$$R_m(N/mm^2) = 226 + A/B + C$$

avec $A = 294(Cu\%) + 147(Si\%) + 44(Ni\%) + 108(Mn\%) [1 - (C\%)]$

$$B = 1 - 0,15(C\%)$$

$$C = 255 [(C\%) - 1]$$

valable dans les limites suivantes :

$$C\% < 0,5 - Mn\% \leq 1,5 - Si\% \leq 1,8 - Ni\% \leq 1,8 - Cu\% \leq 0,8$$

Pour apprécier correctement l'effet du durcissement des éléments d'alliage, il est donc important de savoir comment ces derniers vont se répartir entre la ferrite et la cémentite. Dans le cas des **aciers peu alliés**, on peut utiliser les coefficients de partage k :

$k = (\% \text{ d'éléments dans la cémentite}) / (\% \text{ d'éléments dans la ferrite})$ qui, à l'équilibre, peut s'exprimer sous la forme suivante [4] :

$$k = \exp[(A + BT)/RT] \quad (1)$$

avec R constante molaire des gaz parfaits,
 T température de formation de la structure (K),
 A, B constantes qui dépendent de l'élément d'alliage (tableau 1).

Tableau 1 – Valeurs des constantes de la relation (1)

Élément d'alliage	A	B
Mn	10 240	- 4,83
Si	0	- 6,0
Ni	- 626	- 0,67
Cr	11 240	- 4,17
Mo	6 540	- 1,40

Enfin, l'introduction ou l'augmentation de la quantité de nickel peut, toutes choses égales par ailleurs, améliorer la résilience de l'acier.

2.3.4 Bore

C'est un élément d'alliage particulier ; il augmente la trempabilité des aciers dans des conditions qui lui sont propres. Il n'agit, bien entendu, que s'il se trouve en solution dans l'austénite, mais son action se fait sentir pour de très faibles teneurs. Il est admis qu'il existe une teneur optimale en bore dissous qui apporte l'augmentation maximale de trempabilité ; cette teneur massique optimale, pour un acier à 0,2 % de carbone, est de l'ordre de 0,002 à 0,003 %. Mais la grande affinité du bore pour l'oxygène et l'azote exige que la désoxydation du métal liquide soit très soignée et que l'azote soit préalablement fixé avant l'addition du bore, si l'on veut que celui-ci ne soit pas neutralisé sous forme de précipités insolubles (oxydes, nitrures). Par ailleurs, la grande affinité du bore pour le carbone fait que, à la température ambiante, le bore des précipité sous la forme de borocarbures $M_{23}(B,C)_6$ et de cémentite substituée $Fe_3(B,C)$; il est nécessaire que ces précipités se dissolvent lors de l'austénitisation, ce qui sera d'autant plus difficile que la teneur en carbone sera plus élevée. Cette situation explique pourquoi l'effet du bore sur la trempabilité des aciers décroît lorsque la teneur en carbone de ces derniers augmente, comme le montre la figure 3 [5]. Il semble que plus [6] que, toutes choses égales par ailleurs, le même effet décroisse quand la trempabilité augmente.

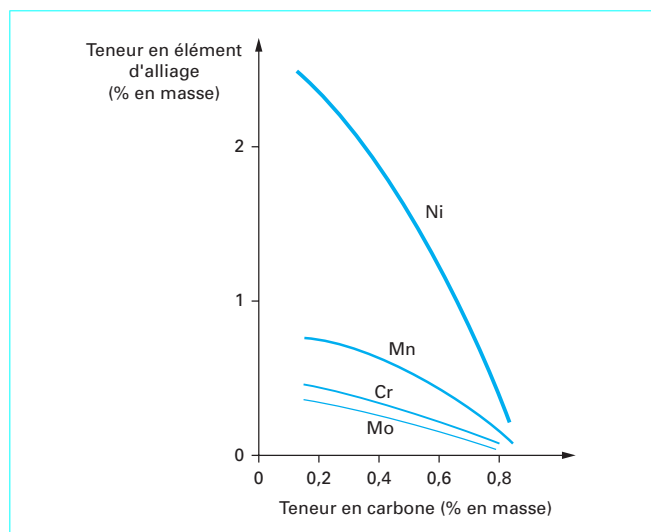


Figure 3 – Évolution, en fonction de la teneur en carbone, des proportions d'éléments d'alliage donnant la même trempabilité que l'addition optimale de bore d'après [5]

2.4 Caractéristiques de résistance et de ductilité

Il est bien connu que la ductilité d'un métal diminue lorsqu'on le durcit. La figure 4 tracée à partir de données relatives aux aciers de traitements thermiques fabriqués en France et traités dans la masse pour obtenir des structures martensitiques revenues décrit, en fonction de la résistance à la traction, les variations de la limite d'élasticité, de l'allongement à la rupture et de l'allongement réparti.

La figure 5 illustre l'évolution, dans les mêmes conditions, de la résilience KCU à 20 °C en fonction toujours de la résistance à la traction. Ce graphique a été complété par la description des variations du facteur d'intensité de contrainte K_{Ic} telles qu'on peut les apprécier à partir de résultats expérimentaux [7] et de la corrélation proposée par Rolfe et Novak [8].

Il faut noter ici que, si les caractéristiques de ductilité et de ténacité varient beaucoup avec la résistance de l'acier, elles sont aussi très dépendantes de l'état inclusionnaire de celui-ci. Ce point est examiné en détails au paragraphe 5 de l'article [M 220] *Inclusions non métalliques dans l'acier*. On retiendra surtout ici que :

- l'augmentation de la teneur en soufre abaisse très sensiblement la ductilité (allongement, striction, résilience) en travers (augmentation de l'effet travers) et semble relever la température de transition de la résilience (mais par contre elle augmente l'usinabilité) ;
- les inclusions oxydées ont aussi un impact important sur la ductilité en travers (surtout si elles sont malléables à chaud) ;
- toutes les inclusions sont susceptibles de faciliter l'initiation d'une fissuration par fatigue.

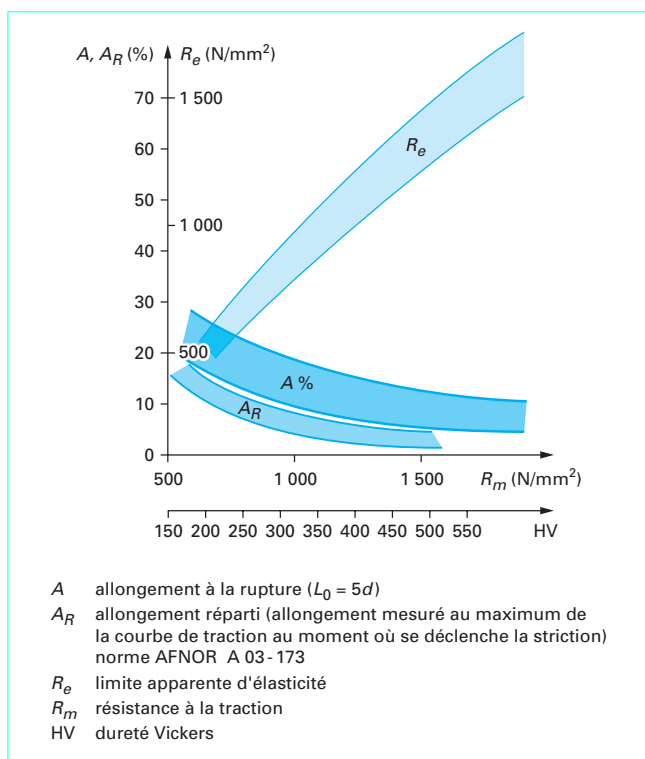


Figure 4 – Évolution des propriétés d'aciers durcis par trempe martensitique et revenu

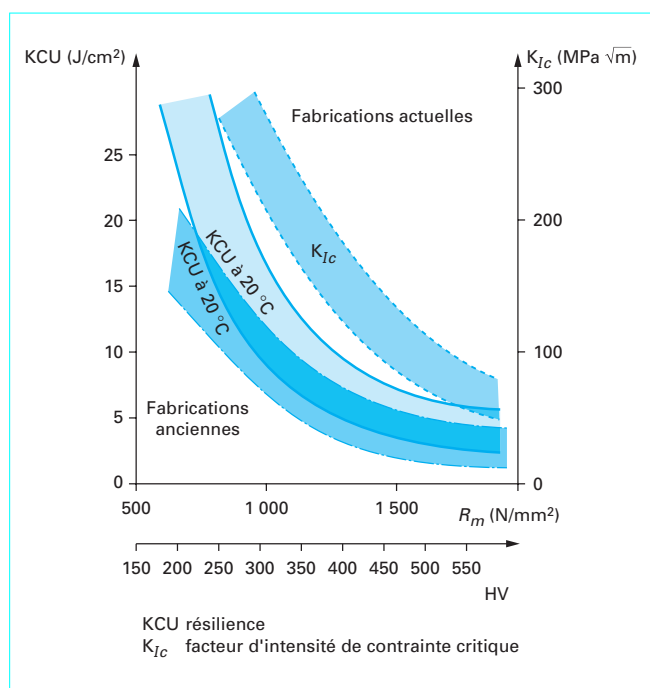


Figure 5 – Évolution de la résilience et du coefficient d'intensité de contrainte critique d'aciers durcis par trempe martensitique et revenu

Ces données expliquent la dispersion affichée sur les figures 4 et 5, en ce qui concerne l'allongement à rupture, la striction, la résilience et l'intensité de contrainte critique ; ces caractéristiques dépendent, par la capacité de durcissement et la trempabilité, du traitement thermique, mais elles varient aussi avec les conditions d'élaboration. La figure 4 sur ce point fait apparaître les conséquences des progrès réalisés grâce à une meilleure maîtrise de l'état inclusionnaire. Ces progrès ont été mis en évidence par Colombié [9] qui a montré que, sur 20 ans en moyenne, les teneurs résiduelles en soufre et phosphore ont été divisées par 10 et celles en oxygène par 4.

Enfin, il ne faut pas oublier que la **fragilité réversible de revenu** (cf. article [M 1 115] *Transformations dans les aciers* peut très sensiblement affecter la résilience d'un acier sans modifier pour autant ses caractéristiques de résistance.

3. Choix d'un acier pour traitement thermique

Pour obtenir les performances mécaniques souhaitées, il faut choisir l'acier en tenant compte de son traitement thermique.

Mais avant de décider du choix de l'acier qui conviendra, le mécanicien doit faire l'inventaire systématique de toutes les exigences qu'il requiert en service pour sa pièce et de celles qui sont imposées par les conditions de fabrication qu'il a décidé d'adopter. Il doit ensuite traduire ces exigences en termes de propriétés mécaniques ou autres que l'acier devra posséder provisoirement pour faciliter la fabrication et surtout définitivement pour assurer le service attendu.

A ce stade le mécanicien peut tenir compte du fait qu'il lui est possible d'approvisionner des barres déjà traitées (par trempe et revenu) qui simplifieront la mise en œuvre en l'accéléralant et en lui évitant d'avoir à prendre en compte les déformations engendrées par le traitement thermique. L'utilisation de barres traitées à usinabilité améliorée (par addition de 0,06 à 0,1 % en masse de soufre, globulisation des sulfures et traitement des oxydes) permet alors de retrouver une usinabilité convenable. Ces possibilités de livraison sont prévues par la norme NF EN 10083 et, par ailleurs, le document FD A 35-555 « Barres en aciers de construction livrées à l'état trempé et revenu » définit de tels produits en fonction de leurs caractéristiques mécaniques. A noter que l'emploi de ces barres traitées n'exclut pas la possibilité de réaliser, *in fine*, certains traitements superficiels (nituration notamment).

Les éléments de base du choix seront toutes les caractéristiques mécaniques imposées par les conditions d'emploi, c'est-à-dire essentiellement :

- la température de service ;
- la limite d'élasticité et la résistance exigée (ainsi qu'éventuellement la limite d'endurance), c'est-à-dire la capacité de durcissement ;
- la localisation éventuelle des sollicitations mécaniques ;
- l'allongement à rupture et la résilience.

Ces caractéristiques seront complétées par les paramètres qui devront rendre possible l'exécution du traitement thermique.

3.1 Paramètres du choix et leur prise en compte

3.1.1 Température de service

Un service à haute température exige, pour que la structure et les propriétés mécaniques restent inchangées, que le revenu initial ait été réalisé à une température supérieure à la température de service et ce d'autant plus que la durée de service est plus longue.

A titre indicatif, la formule d'Hollomon et Jaffe (voir article [M 1 115] *Transformation dans les aciers*) :

$$F(\text{dureté}) = T(f(C\%) + \lg(t))$$

avec T température de revenu (K),
 t durée du revenu (h),
 $f(C\%) = 21,3 - 5,8(C\%)$

permet d'estimer quel doit être, en fonction de la durée de service, la valeur minimale du rapport entre la température de revenu et la température de service (tableau 2) pour assurer la stabilité de la structure et donc des caractéristiques mécaniques d'acier à 0,3-0,4 % de carbone. A noter que le revenu à 525/550 °C permet de ne pas poser pratiquement le problème de la température de service si cette dernière ne dépasse pas 450 °C.

Tableau 2 – Valeurs minimales indicatives du rapport température de revenu (°C)/température de service (°C), selon les durées de revenu et de service (0,3 à 0,4 % C)

Durée de service	Durée de revenu		
	1 h	5 h	10 h
1 semaine	1,11	1,06	1,04
1 mois	1,16	1,10	1,08
1 an.....	1,24	1,18	1,16
10 ans.....	1,31	1,25	1,23

3.1.2 Paramètres du durcissement

Le paramètre principal qui conditionne le durcissement est la **teneur en carbone**. La figure 6 permet d'en apprécier l'importance et de choisir, en l'absence de durcissement secondaire, la gamme utile des teneurs en carbone en fonction du domaine de température de revenu adopté.

Un second paramètre peut intervenir ; il concerne l'effet du durcissement secondaire apporté par les **éléments d'alliage carburigènes** (Mo, V, Cr, W...). Il n'est sensible que si la température de revenu est assez élevée (> 575 °C) pour provoquer la remise en solution de la cémentite et la précipitation des carbures de ces éléments. Ainsi le choix d'un acier contenant un ou des éléments d'alliage carburigènes permet d'obtenir, par revenu à haute température, un durcissement plus important et donc des caractéristiques de résistance plus élevées. Ce choix est notamment justifié quand la température de service impose la réalisation d'un revenu à haute température.

3.1.3 Localisation éventuelle des sollicitations mécaniques

Si les **sollicitations sont uniformes** dans la section de la pièce, le choix devra se porter vers un acier pour traitement dans la masse, éventuellement renforcé en surface pour assurer sa tenue à la fatigue.

Si les **sollicitations ne sont importantes que dans la zone périphérique de la pièce**, il sera judicieux d'examiner quel traitement superficiel peut suffire (trempe incomplète ou trempe après chauffage superficiel) ou quel traitement thermochimique peut convenir. Il faudra alors choisir l'acier dans la gamme des aciers aptes à recevoir un tel traitement.

3.1.4 Allongement à rupture et résilience

Les valeurs imposées devront être confrontées à celles qui caractérisent les nuances utilisables. Si le bilan de cette confrontation est négatif, on pourra envisager les solutions suivantes :

- utiliser un acier disposant d'une capacité de durcissement supérieure à celle strictement nécessaire et procéder à un revenu plus poussé ;
- imposer des conditions plus sévères que celles prévues pour l'état inclusionnaire.

3.1.5 Paramètres de faisabilité du traitement thermique

Il s'agit des facteurs dont va dépendre la réussite du traitement thermique. En fait le paramètre fondamental est ici la **trempeabilité** qui va permettre, lors de la trempe de la pièce considérée, de transformer en martensite tout le volume qui doit être durci. Cette trempeabilité dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont les teneurs en éléments d'alliage et, indirectement, la teneur en carbone (dont l'influence apparaît comme essentiellement multiplicatrice de celles des éléments d'alliage). Les figures 7 et 8 proposent, à titre indicatif et pour aider au choix, une évaluation et un classement relatif des trempeabilités des nuances des normes NF EN 10083-1 (figure 7) et NF EN 10084 (figure 8) en fonction de leur teneur en carbone. A titre indicatif toujours, le tableau 3 donne une estimation, pour des cylindres, des diamètres maximaux qui, selon le milieu de trempe choisi, permettront de réaliser la trempe à cœur ou à mi-rayon.

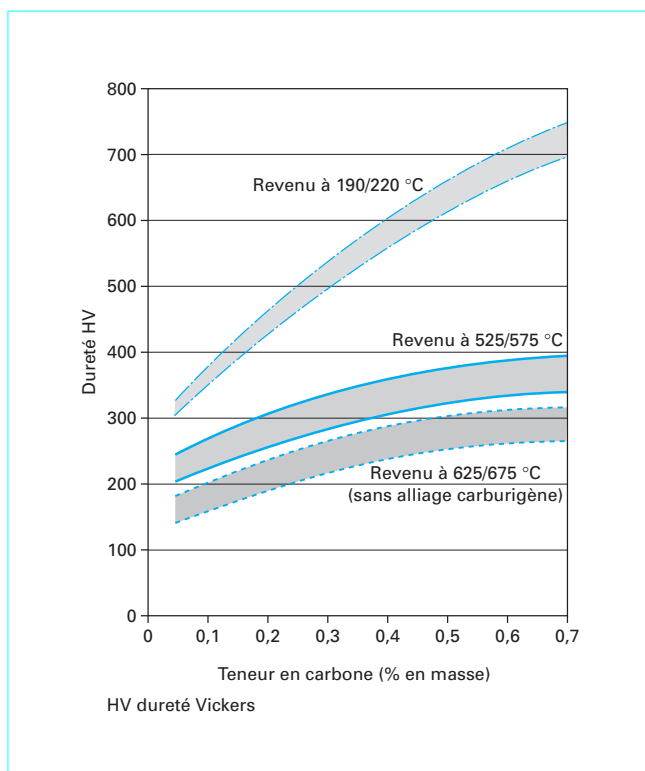


Figure 6 – Dureté des martensites en fonction de la teneur en carbone et de la température de revenu

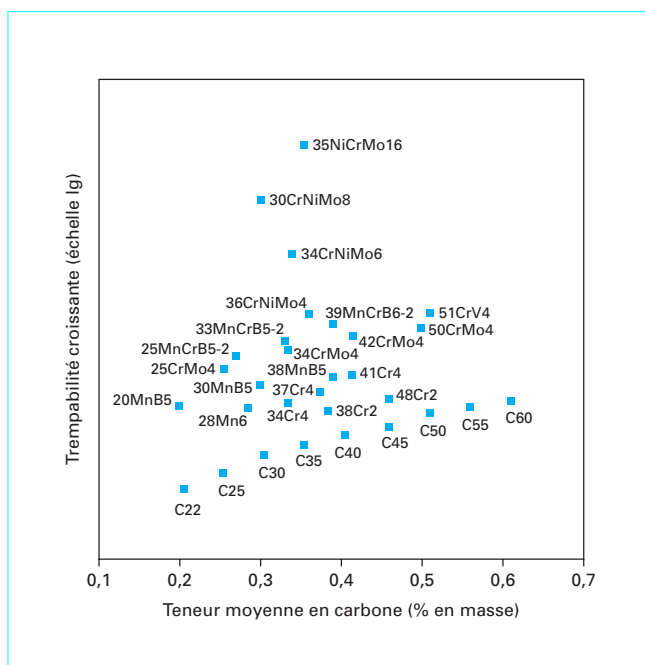


Figure 7 – Teneur en carbone et trempeabilité des aciers, selon les normes NF EN 10083-1 et NF EN 10083-3

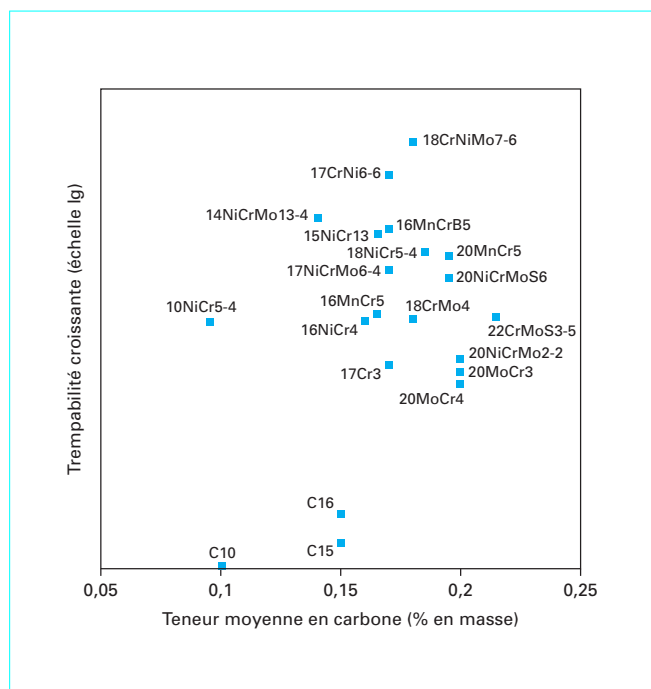


Figure 8 – Teneur en carbone et trempabilité des aciers, selon la norme NF EN 10084

La fixation de la trempabilité nécessaire (et donc le choix de certaines compositions chimiques) pour rendre possible la réalisation de la transformation martensitique doit tenir compte des **conditions de trempage réalisables industriellement**. C'est ici qu'apparaissent les autres paramètres de faisabilité ; ceux qui conditionnent le refroidissement de la pièce lors de la trempe et qui sont :

- le ou les milieux de trempage disponibles et le pouvoir refroidissant des installations correspondantes. Il faut noter que le choix des milieux de trempage est assez limité ; *trempe à l'eau* ou *trempe à l'huile* et, éventuellement *trempe au gaz* (généralement dans une installation travaillant sous vide) ;
- la géométrie de la pièce et ses dimensions qui conditionnent son refroidissement.

A ce stade, il devient indispensable de consulter le spécialiste qui sera ultérieurement responsable de l'exécution du traitement thermique afin de définir avec lui ce que pourront être les conditions de refroidissement des pièces, ce qui permettra d'estimer la trempabilité nécessaire. Ce travail pourra être ébauché à l'aide des informations données par les normes, les producteurs ou des données comme celles présentées au tableau 4.

3.2 Choix final

Le mécanicien doit alors prendre en compte les exigences liées à la mise en œuvre et notamment celles concernant :

- les techniques de mise en forme (en tenant compte des aspects économiques et des équipements disponibles) qui peuvent être :

- *l'usinage* : intérêt d'emploi d'aciers judicieusement traités pour faciliter cette opération et d'aciers à usinabilité améliorée,

- *l'estampage* ou le *forgeage à chaud*, nécessitant une garantie d'absence de défauts préjudiciables à cette opération,
- la *mise en forme à froid* par extrusion ou frappe à froid, exigeant un traitement préalable spécifique et l'absence de défauts préjudiciables à cette opération ;
- l'éventualité d'assemblage par soudage ;
- la possibilité d'effectuer des traitements thermiques à diverses étapes de fabrication ou sur pièces finies et, dans ce dernier cas, les tolérances dimensionnelles et l'état de surface recherché.

Une telle analyse fera apparaître, dans la plupart des cas, l'aspect contradictoire de certaines exigences de service et des impératifs de la mise en œuvre (résistance, ductilité, ténacité) confrontés avec une bonne usinabilité et une facilité de mise en forme, par exemple.

La remise en cause de l'utilisation de moyens traditionnels de fabrication pourra parfois se révéler bénéfique, car elle ouvre la porte à l'utilisation de procédés modernes souvent plus performants.

Ce processus permettra très probablement de sélectionner un certain nombre de nuances devant être trempées soit à l'eau, soit à l'huile, soit à l'air, nuances qui différeront à la fois par leur teneur en carbone et par leur richesse en éléments d'alliage.

L'ultime choix se fera alors en prenant en considération différents facteurs :

- les nécessités de limiter les déformations et d'éviter des risques de tapures lors de la trempe conduiront à éliminer, suivant la forme et les dimensions des pièces, les aciers demandant une trempe à l'eau ;
- la crainte de rencontrer des difficultés lors de l'usinage ou du formage, voire éventuellement du soudage, de même que la recherche de caractéristiques de ductilité élevées, peuvent conduire à rejeter les aciers à teneur en carbone élevée ;
- la plus ou moins grande qualité d'exécution des traitements thermiques peut faire préférer des nuances qui laissent au praticien une plus grande marge de manœuvre ;
- le souci d'éviter la multiplication des nuances dans un stock peut faire pencher le choix vers certaines nuances déjà utilisées ;
- les possibilités d'approvisionnement peuvent faire préférer certaines nuances plus disponibles ou dans lesquelles sont proposés les produits de départ nécessaires ;
- enfin (et surtout), la comparaison du coût des différentes nuances apportera un élément de choix important dont l'influence pourra être différente d'un moment à un autre suivant les conditions du marché.

3.3 Aides au choix

Différents moyens sont proposés pour aider au choix d'un acier :

- l'Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier (OTUA, La Défense) a publié une méthode pratique de prévision de la réponse d'un acier aux traitements thermiques avec application au choix de la nuance et à la mise au point du traitement thermique. Les données nécessaires à son utilisation sont publiées dans la même collection des dossiers techniques ;
- le Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM, Senlis) a mis au point un logiciel d'aide au choix des aciers et de leur traitement thermique ; CETIM-SICLOP complété par des banques de données sur les matériaux ;
- ASHBY et l'Université de Cambridge (Granta Design limited, Trumpington Mews Trumpington Cambridge, Royaume-Uni) proposent le logiciel *Cambridge Materials Selector* d'aide au choix des matériaux, il contient sa propre banque de données ;
- Bassetti (SNC Bassetti et Isaac, Grenoble) propose le logiciel de choix *Fuzzimat* qui contient sa propre banque de données que l'utilisateur peut enrichir selon ses disponibilités.

Tableau 3 – Estimation approximative des diamètres maximaux (en mm) de cylindres pour trempe

Nuance	A cœur (1)		A mi-rayon (1)	
	Eau ($H = 0,08 \text{ mm}^{-1}$)	Huile ($H = 0,015 \text{ mm}^{-1}$)	Eau ($H = 0,08 \text{ mm}^{-1}$)	Huile ($H = 0,015 \text{ mm}^{-1}$)
$0,17 \leq C\% \leq 0,24$				
C22	12	4	14	4
20MnB5	25	9	29	9
$0,22 \leq C\% \leq 0,34$				
C25	14	4	16	4
C30	17	5	19	5
28Mn6	25	9	28	9
30MnB5	30	11	35	11
25CrMo4	35	13	40	14
27MnCrB5-2	39	15	46	16
30CrNiMo8	149	77	193	83
$0,30 \leq C\% \leq 0,40$				
C35	18	6	21	6
34Cr4	26	9	30	9
34CrMo4	41	16	48	17
33MnCrB5-2	44	17	52	18
36CrNiMo4	56	23	67	24
34CrNiMo6	93	43	116	46
36NiCrMo16	237	135	321	150
$0,34 \leq C\% \leq 0,54$				
C40	20	6	22	7
C45	21	7	24	7
C50	24	8	27	9
38Cr2	24	8	28	9
46Cr2	27	9	31	10
37Cr4	29	10	33	11
38MnB5	32	12	38	12
41Cr4	33	12	38	13
42CrMo4	47	18	55	20
50CrMo4	49	20	59	21
39MnCrB6-2	51	21	61	22
51CrV4	57	24	68	25
$0,52 \leq C\% \leq 0,65$				
C55	25	9	29	9
C60	27	9	30	10

(1) H sévérité de trempe selon Grossman [M 1 115].

Tableau 4 – Estimation approximative des diamètres maximaux (en mm) de cylindres pour trempe

Nuance	A cœur (1)		A mi-rayon (1)	
	Eau ($H = 0,08 \text{ mm}^{-1}$)	Huile ($H = 0,015 \text{ mm}^{-1}$)	Eau ($H = 0,08 \text{ mm}^{-1}$)	Huile ($H = 0,015 \text{ mm}^{-1}$)
Pour une résistance R_m de 850 à 1 000 N/mm ² après revenu à 550 °C				
C22	12	4	14	4
20MnB5	25	9	29	9
Pour une résistance R_m de 875 à 1 075 N/mm ² après revenu à 550 °C				
C25	14	4	16	4
C30	17	5	19	5
28Mn6	25	9	28	9
30MnB5	30	11	35	11
25CrMo4	35	13	40	14
27MnCrB5-2	39	15	46	16
30CrNiMo8	149	77	193	83
Pour une résistance R_m de 950 à 1 150 N/mm ² après revenu à 550 °C				
C35	18	6	21	6
34Cr4	26	9	30	9
34CrMo4	41	16	48	17
33MnCrB5-2	44	17	52	18
36CrNiMo4	56	23	67	24
34CrNiMo6	93	43	116	46
36NiCrMo16	237	135	321	150
Pour une résistance R_m de 1 050 à 1 200 N/mm ² après revenu à 550 °C				
C40	20	6	22	7
C45	21	7	24	7
C50	24	8	27	9
38Cr2	24	8	28	9
46Cr2	27	9	31	10
37Cr4	29	10	33	11
38MnB5	32	12	38	12
41Cr4	33	12	38	13
42CrMo4	47	18	55	20
50CrMo4	49	20	59	21
39MnCrB6-2	51	21	61	22
51CrV4	57	24	68	25
Pour une résistance R_m de 1 050 à 1 250 N/mm ² après revenu à 550 °C				
C55	25	9	29	9
C60	27	9	30	10

(1) H sévérité de trempe selon Grossman [M 1 115].