

Métallurgie des traitements thermiques des aciers

Cette nouvelle rubrique a pour ambition de faire un tour d'horizons des aspects métallurgiques des traitements thermiques des aciers. Une série d'articles sera proposé au fil des numéros. Tous ont pour but de montrer ce que la métallurgie apporte aux traitements thermiques des aciers.

Guy Murry
Ingénieur conseil

Ceci n'est pas un cours théorique de métallurgie. L'ensemble des articles tentera de répondre à la question «Qu'apporte la métallurgie aux traitements thermiques des aciers?».

Rappelons que le but du traitement thermique est de conférer au métal des propriétés particulières adaptées à sa mise en œuvre ou à son utilisation et que, pour ce faire, il consiste à effectuer une succession d'opérations pendant lesquelles un acier est soumis à l'état solide à un ou plusieurs cycles thermiques. Au cours de ces opérations, l'action d'un milieu environnant judicieusement choisi peut modifier, plus ou moins profondément, la composition chimique des couches superficielles et permettre ainsi de leur conférer des propriétés particulières. Les cycles thermiques imposés aux aciers comportent tous des chauffages plus ou moins rapides suivis de maintiens en température plus ou moins longs, ainsi que des refroidissements plus ou moins rapides ou plus ou moins lents.

Après une série de rappels concernant les aciers, la série d'articles débutera donc par l'analyse des phénomènes métallurgiques engendrés par ces opérations élémentaires. Puis les chapitres suivants traiteront des divers aspects métallurgiques des combinaisons de ces dernières dans les différents types de traitements thermiques comme le recuit, la trempe et le revenu, les traitements thermochimiques, mais aussi la normalisation, l'affinage structural, l'homogénéisation, la stabilisation, la détente ou la relaxation. Enfin, seront examinés les aspects métallurgiques des traitements thermiques spécifiques des grandes classes d'acier : aciers de construction mécanique, aciers inoxydables, aciers à outils et aciers de construction métallique.

RAPPELS DE NOTIONS DE BASE

Qu'appelle-t-on acier ? Selon la norme NF EN 10020, les aciers sont des alliages métalliques dont la base est constituée par du fer et qui, pour la plupart, contiennent

du carbone comme éléments d'alliage. Leur teneur maximale en carbone est, s'ils ne contiennent pas d'autre élément d'alliage, de l'ordre de 2,11%. S'ils contiennent d'autres éléments d'alliage, cette limite peut changer. Au-delà de cette limite, les alliages fer + carbone sont appelés des fontes.

Suivant sa composition chimique un acier est dit non allié ou allié. Un acier est considéré comme allié dès que la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée (ou 70 % de la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée) dépasse les limites rassemblées dans le **tableau 1** (pour le manganèse, la limite est portée à 1,80 % si seule la teneur maximale est imposée).

LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU FER

Le fer pratiquement pur n'est pas mécaniquement performant (cette remarque est d'ailleurs vraie pour tous les métaux purs).

Re est voisine de 170 et Rm de 300 N/mm²

Or, les mécaniciens exigent que la limite d'élasticité des aciers qu'ils utilisent atteigne des niveaux de l'ordre de 800, 1000,

1300, voire 1500 ou 1800 N/mm² et sont encore plus exigeants en ce qui concerne la dureté de certains aciers d'outillage. Il est donc nécessaire de "durcir" le fer.

Comment durcit-on le fer ? Pour augmenter la limite d'élasticité du fer au voisinage de la température ambiante, on peut introduire des atomes étrangers en solution solide, écrouir le fer, affiner la taille des grains constituant le métal, ou provoquer la formation de précipités.

En pratique, le principal moyen utilisé pour durcir le fer est le durcissement par précipitation de carbures de fer ou d'éléments d'alliage. Il peut, parfois, être complété par l'affinement de la taille des grains. Mais les réalités industrielles font que les conditions dans lesquelles se déroule la solidification après l'élaboration d'un acier ne permettent pas de maîtriser la précipitation qui est alors systématiquement trop grossière. Il est donc indispensable d'intervenir pour faire en sorte que les précipités soient les plus fins possible^[1]. L'obtention de ce résultat exige que les précipités trop gros soient dissous puis précipités à nouveau plus finement. Et ceci à l'état solide pour pouvoir conférer les propriétés voulues à chaque pièce préalablement mise en forme. Ce sont les traitements thermiques classiques qui permettent de maîtriser ce processus.

Tableau 1.

Délimitation entre aciers non alliés et aciers alliés.
(1) et (2) lorsque ces éléments sont spécifiés par 2 ou 3 ou 4, la valeur limite de la somme est égale à 70 % de la somme des valeurs individuelles.
(3) exceptés C, P, S, et N.

Élément spécifié	limite %	Élément spécifié	limite %	Élément spécifié	limite %
Al	0,10	Mn	1,65 ⁽³⁾	Ti ⁽²⁾	0,05
B	0,0008	Mo ⁽¹⁾	0,08	V ⁽²⁾	0,10
Co	0,10	Nb ⁽²⁾	0,06	W	0,10
Cr	0,30	Ni ⁽¹⁾	0,30	Zr ⁽²⁾	0,05
Cu	0,40	Si	0,50	Autres ⁽³⁾	0,05

POURQUOI DES ALLIAGES FER + CARBONE ?

Pour comprendre l'intérêt des alliages Fe + C et les mécanismes de leur durcissement, il est nécessaire de prendre en compte la donnée théorique qu'est le diagramme d'équilibre^[2] fer + carbone. La **figure 1** retrace la partie de celui-ci qui est relative aux aciers (ici C % < 2,11).

Ce diagramme indique que :

- Le fer pur peut, à l'équilibre, exister sous deux états cristallins :
 - Cubique centré au-dessous de 912 °C (il est alors dit fer α ou ferrite) et entre 1394 °C et sa fusion qui se fait à 1538 °C (il est alors dit fer δ).
 - Cubique à faces centrées entre 912 °C et 1 394 °C (il est alors dit fer γ ou austénite).
- La solubilité du carbone dans le fer dépend de la température mais aussi beaucoup de l'état cristallin de ce dernier. Le **tableau 2** en donne quelques valeurs indicatives.
- Au-dessous de 727 °C (limite BEG), les alliages Fe+C sont constitués de deux phases : la ferrite dans laquelle le carbone n'est pratiquement pas soluble, et le carbure de fer Fe_3C . Ainsi donc le carbure de fer devient une deuxième phase (mêlée à la ferrite) qui, si sa morphologie est affinée et sa répartition judicieusement organisée, va constituer un précipité durcissant.
- Au-dessus des températures définies par la limite CED et au-dessous des températures définies par la limite JHD (c'est-à-dire dans le domaine CEDHJ), l'alliage est constitué d'austénite dans laquelle tout le carbone présent est en solution solide. L'existence de ce domaine ouvre la possibilité de mettre tous les carbures de fer (trop grossiers) en solution solide afin de préparer leur reprécipitation ultérieure en fines particules durcissantes.

CHANGEMENTS STRUCTURAUX À L'ÉQUILIBRE

Les changements structuraux d'un alliage fer+carbone en conditions d'équilibre se font dans les domaines (**figure 1**) BCE et GED. On constate que le diagramme possède à 727 °C un point particulier, le point E (correspondant à un alliage Fe+C à 0,77 % de carbone) au passage duquel évolue l'équilibre Ferrite (à 0,022 % C) + Carbure de fer Fe_3C (à 6,69 % C) $\leftrightarrow$ Austénite (à 0,77 % C). **Aux températures inférieures à 727 °C**, l'alliage est constitué^[3] de ferrite et de cémentite :

• À 20 °C :

$100 \times (6,69 - 0,77) / (6,69) = 88,49\%$ de ferrite sans carbone et $100 \times (0,77) / (6,69) = 11,51\%$ de cémentite

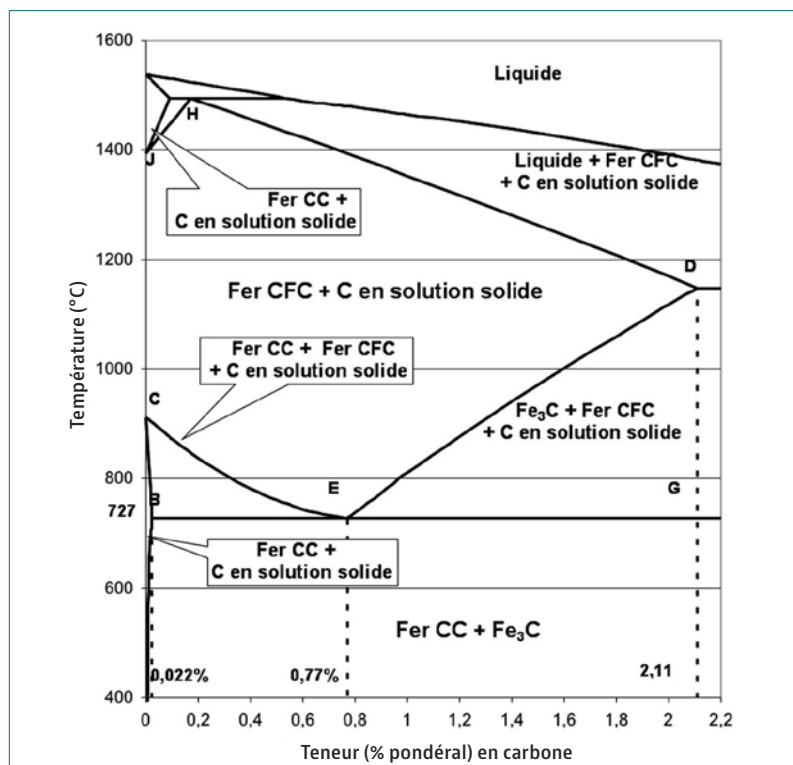
• À 727 °C :

$100 \times (6,69 - 0,77) / (6,69 - 0,022) = 88,78\%$ de ferrite à 0,022 %C et $100 \times (0,77 - 0,022) / (6,69 - 0,022) = 11,22\%$ de cémentite.

Aux températures supérieures à 727 °C, l'alliage est constitué de 100 % d'austénite contenant en solution solide 0,77 % de carbone.

En conditions d'équilibre, lors du passage à 727 °C :

- Au chauffage, la ferrite se transforme en austénite dans laquelle la cémentite se dissout.
- Au refroidissement, l'austénite se transforme en ferrite en rejetant le carbone qui précipite sous forme de



cémentite. Cette évolution engendre la formation d'un agrégat (dit "eutectoïde") de grains de cémentite et de grains de ferrite.

En conditions d'équilibre, les alliages fer+carbone dont la teneur en carbone est comprise entre 0,022 et 0,77 (aciers dits "hypoeutectoïdes") se transforment, dans le domaine BCE. Les transformations se déroulent en deux séquences :

Au chauffage :

- À 727 °C, la transformation eutectoïde intéresse tout le carbone mais seulement une partie de la ferrite.
Ferrite (à 0,022 % C) + Carbure de fer Fe_3C $\leftrightarrow$ Austénite (à 0,77 % C)

• À température supérieure à 727 °C et jusqu'à la limite CE (**figure 1**), la ferrite restante se transforme en austénite et la diffusion du carbone assure sa distribution dans toute la masse d'austénite.

Au refroidissement :

- Au-dessous de la limite CE (**figure 1**) et jusqu'à 727 °C, une partie de l'austénite se transforme progressivement en ferrite tout en rejetant le carbone dans l'austénite non encore transformée qui s'enrichit donc jusqu'à atteindre sa saturation (à 0,77 % à 727 °C).
- À 727 °C l'austénite restante saturée subit la transformation eutectoïde Austénite (à 0,77 % C) $\rightarrow$ Ferrite (à 0,022 % C) + Carbure de fer Fe_3C

Figure 1.

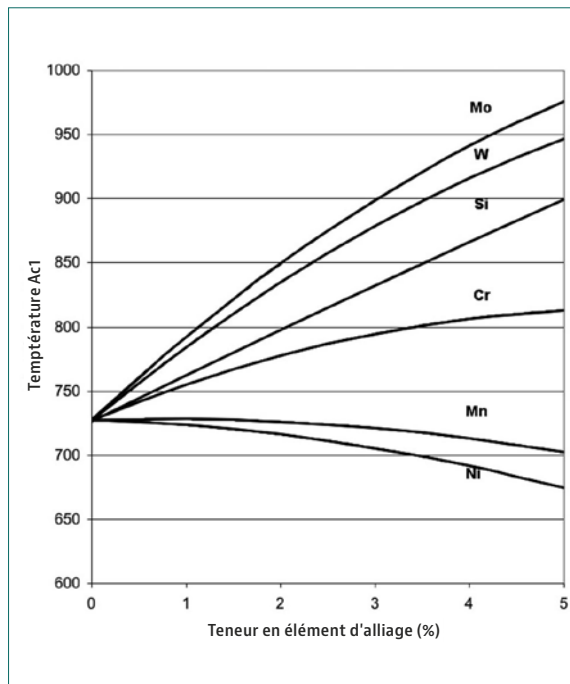
Diagramme d'équilibre Fe+C

Tableau 2.

Solubilité du carbone dans le fer solide

Fer α		Fer γ	
Température °C	C %	Température °C	C %
200	<0,000001	727	0,77
400	<0,0001	900	1,2
600	<0,006	1100	1,92
727	0,022	1148	2,11

Figure 2.
Influences des
éléments d'alliage.



Ainsi donc, à 727 °C, après achèvement des transformations, un alliage à x% ($0,02 < x < 0,77$) de carbone sera constitué de :

$$(6,69 - x) / (6,69 - 0,022) \% \text{ de ferrite}$$

$$(x - 0,022) / (6,69 - 0,022) \% \text{ de cémentite.}$$

Ou, autrement dit :

$$(0,77 - x) / (0,77 - 0,022) \% \text{ de ferrite proeutectoïde}$$

$$(x - 0,022) / (0,77 - 0,022) \% \text{ d'agrégat eutectoïde.}$$

En conditions d'équilibre, les alliages fer+carbone dont la teneur en carbone est comprise entre 0,77 et 2,11 (aciers dits "hypereutectoïdes") se transforment, dans le domaine DEG. Les transformations se déroulent en deux séquences :

Au chauffage :

- À 727 °C, la transformation eutectoïde intéresse tout la ferrite mais seulement une partie de la cémentite.

$$\text{Ferrite (à } 0,022\% \text{C)} + \text{Carbure de fer Fe}_3\text{C}$$

$$\rightarrow \text{Austénite (à } 0,77\% \text{C)}$$

- À température supérieure à 727 °C et jusqu'à la limite ED (figure 1) la cémentite restante se dissout dans l'austénite et la diffusion du carbone assure sa distribution dans toute la masse d'austénite.

Au refroidissement :

- Au-dessous de la limite ED (figure 1) et jusqu'à 727 °C, une partie du carbone précipite sous forme de cémentite pour dé-saturer l'austénite qui, à 727 °C ne contient plus que 0,77% de carbone.

- À 727 °C, l'austénite saturée à 0,77%C subit la transformation eutectoïde

$$\text{Austénite (à } 0,77\% \text{C)} \rightarrow \text{Ferrite}$$

$$(\text{à } 0,022\% \text{C)} + \text{Carbure de fer Fe}_3\text{C}$$

Ainsi donc, à 727 °C, après achèvement des transformations, un alliage à x% ($0,77 < x < 2,11$) de carbone sera constitué de :

$$(6,69 - x) / (6,69 - 0,022) \% \text{ de ferrite}$$

$$(x - 0,022) / (6,69 - 0,022) \% \text{ de cémentite.}$$

Ou, autrement dit :

$$(x - 0,77) / (6,69 - 0,77) \% \text{ de cémentite proeutectoïde}$$

$$(6,69 - x) / (6,69 - 0,77) \% \text{ d'agrégat eutectoïde.}$$

Les domaines dans lesquels se déroulent les transformations en conditions d'équilibre sont encadrés par des températures repères qui sont désignées par la lettre A suivie par la lettre e qui rappelle qu'il s'agit de conditions d'équilibre et par un chiffre ou une autre lettre. Ainsi on définit :

- La température Ae1 qui correspond à la limite BEG (figure 1) en dessous de laquelle l'austénite n'est pas stable.
 - La température Ae3 qui, pour les aciers hypoeutectoïdes, correspond à la limite CE (figure 1) au-dessus de laquelle la ferrite n'est pas stable.
 - La température Aem qui, pour les aciers hypereutectoïdes correspond à la limite ED (figure 1) en dessous de laquelle le carbone n'est plus totalement soluble dans l'austénite.
- Mais en pratique, et pour tenir compte des difficultés rencontrées pour satisfaire aux conditions d'équilibre, on se réfère à des températures repères Ac1, Ac3 et Acm déterminées au cours de chauffages assez lents (150 °C à 300 °C / heure) pour que les résultats diffèrent très peu (ils sont supérieurs de quelques degrés) de Ae1, Ae3 et Aem.

INFLUENCES DES ÉLÉMENTS D'ALLIAGE AUTRES QUE LE CARBONE

De nombreux éléments d'alliage autres que le carbone sont ajoutés aux aciers pour modifier leurs propriétés ou leur comportement. Ces éléments peuvent être classés selon différents critères :

Éléments modifiant l'état de précipitation du carbone.

Il s'agit d'éléments ayant pour le carbone une affinité supérieure à celle du fer et qui auront tendance, selon les circonstances :

- soit à former leur propre carbure,
- soit à former avec le fer des carbures mixtes,
- soit à se substituer partiellement au fer dans des cémentites dites alors substituées.

Ces éléments sont dits "carburi-gènes" et parmi eux on peut citer : Cr, Mo, V, W, Nb, Ti. Ils modifient les conditions de précipitation du carbone et permettent souvent de former des carbures fins, voire très fins et donc plus durcissants que Fe₃C.

Éléments modifiant l'équilibre Fe α $\leftrightarrow$ Fe γ .

On distingue :

- Les éléments dits "gammagènes" qui élargissent le domaine de stabilité de l'austénite au point, pour de fortes additions, de rendre cette structure stable à toutes températures dans des aciers dits alors "austénitiques". Ce sont le manganèse, le nickel et le cuivre (ce dernier est peu utilisé).
- Les éléments dits "alphagènes" qui élargissent le domaine de stabilité de la ferrite au point, pour de fortes additions, de rendre cette structure stable à toutes températures dans des aciers dits alors "ferritiques". Ce sont, notamment, le silicium, le chrome, le molybdène, le vanadium, le titane, le tungstène.

Ces additions modifient donc le niveau des températures repères Ac1, Ac3 et Acm. Il est intéressant de considérer tout d'abord les évolutions des coordonnées du point correspondant à la transformation eutectoïde des alliages Fe + C + X (X étant un élément d'alliage donné) :

Sa température (qui est Ac1) varie comme l'illustre la

figure 2 qui permet de bien distinguer l'influence des éléments alphagènes (Ac1 augmente) de celle des éléments gammagènes (Ac1 diminue). Andrews a proposé de rendre compte de ces évolutions à l'aide d'une formule empirique :

$$\begin{aligned} \text{Ac1} (^{\circ}\text{C}) &= 727 - 10,7 (\text{Mn} \%) \\ &- 16,9 (\text{Ni} \%) + 29,1 (\text{Si} \%) + 16,9 (\text{Cr} \%) \\ &+ 6,38 (\text{W} \%) \end{aligned}$$

Sa teneur en carbone se trouve abaissée par tous les éléments d'alliage (figure 3). La limite entre les aciers hypoeutectoïdes et les aciers hypereutectoïdes s'en trouve déplacée.

Pour les aciers hypoeutectoïdes les variations de Ac3 suivent celles de Ac1. Elles peuvent être décrites à l'aide de formules empiriques comme celle d'Andrews :

$$\begin{aligned} \text{Ac3} &= 910 - 203 \div \text{C} \% - 30 (\text{Mn} \%) \\ &+ 11 (\text{Cr} \%) - 15,2 (\text{Ni} \%) + 44,7 (\text{Si} \%) \\ &+ 104 (\text{V} \%) + 31,5 (\text{Mo} \%) + 13,1 (\text{W} \%) \end{aligned}$$

On constate par ailleurs que la solubilité du carbone dans l'austénite des alliages Fe + C + X diminue avec l'addition de l'élément d'alliage : à titre d'exemple la figure 4 illustre cet effet à la température de 1000 °C.

Les différents traitements thermiques

L'ensemble des traitements thermiques comporte :

Des traitements thermiques de durcissement aux cours desquels l'acier est soumis à :

- Un chauffage avec passage à l'état austénitique et éventuellement un maintien à la température maximale pour mettre en solution les carbures durcissant ; c'est l'austénitisation.
- Un refroidissement plus ou moins rapide pour empêcher la précipitation des carbures pendant le retour à la température ambiante ; c'est la trempe.
- un ré-chauffage limité réalisé à partir d'un état hors équilibre et dans des conditions permettant de développer le durcissement optimum par précipitation ; c'est le revenu.
- éventuellement ces opérations peuvent être couplées avec une modification de la composition chimique superficielle par diffusion à température et en atmosphère idoines. On parle alors de traitements thermochimiques.
- Des traitements thermiques d'adoucissement aux cours desquels l'acier peut être soumis à :
- Un chauffage avec passage à l'état austénitique et éventuellement un maintien à la température maximale pour mettre en solution les carbures durcissant ; c'est l'austénitisation.
- Un refroidissement plus ou moins lent pour provoquer une précipitation de carbures relativement grossiers et peu durcissant.

L'ensemble de ces deux opérations constitue un recuit.

Un adoucissement peut être aussi obtenu pour certains aciers à l'aide d'un chauffage limité réalisé dans des conditions permettant de globuliser les précipités et donc les rendre moins durcissant ; c'est le revenu maximum.

Des traitements divers :

- Normalisation : austénitisation suivie d'un refroidissement à l'air.
- Affinage structural : austénitisation suivie d'un refroidissement conduisant à une structure adoucie et à grains fins.

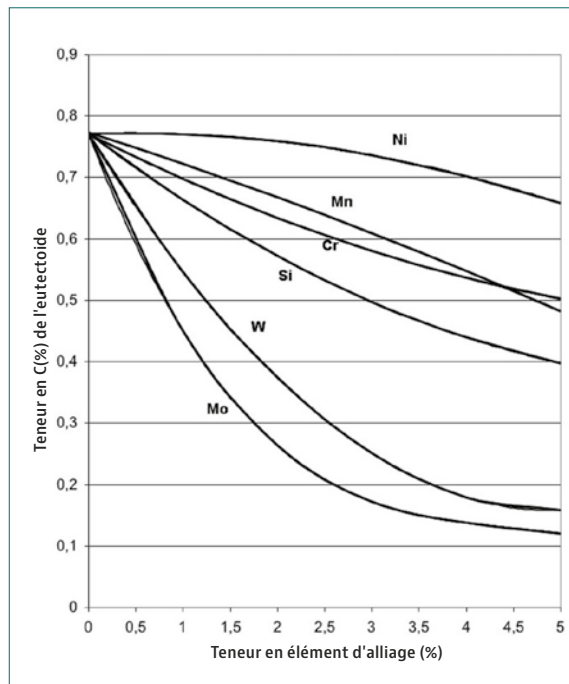


Figure 3.
Teneur en carbone.

- Homogénéisation : austénitisation à haute température avec un maintien de longue durée pour permettre la diffusion des éléments d'alliage ségrégés.
- Stabilisation ou détente ou relaxation : chauffage à température modérée pour abaisser le niveau des contraintes résiduelles sans affecter la structure.

Les plus importants de ces traitements thermiques comportent des opérations élémentaires, à savoir l'austénitisation, le refroidissement provoquant des transformations structurales et le revenu. ■

1. Pour les aciers, la notion de taille optimale des précipités échappe à la pratique : un précipité n'est jamais trop fin.
2. Rappelons que les cycles thermiques correspondant
3. sont infiniment lents.
4. Application de la règle des segments inverses.
5. J.I.S.I. July 1965 – 293 – 1

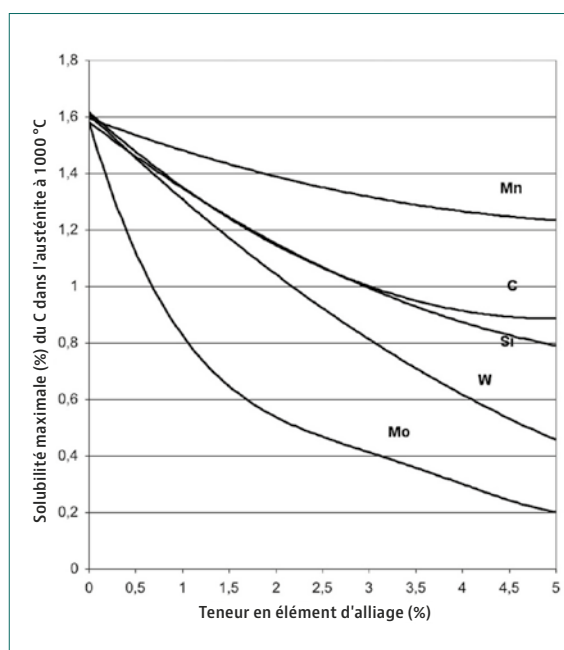


Figure 4.
Solubilité du carbone.