

Traitements thermiques des métaux et alliages

par **Philippe POUPEAU**

*Ingénieur des Arts et Manufactures, Docteur-Ingénieur
Professeur à l'École Centrale des Arts et Manufactures*

1. Nécessité des traitements thermiques	M 1 105 - 2
1.1 Principes, buts et rôle des traitements thermiques	— 2
1.2 Évolution historique des traitements thermiques	— 2
2. Conception structurale des métaux et alliages	— 4
2.1 Relations entre la structure et les propriétés	— 4
2.2 Mécanismes structuraux contrôlant les propriétés des métaux et alliages.....	— 5
2.3 Résistance à des sollicitations mécaniques statiques à température ambiante.....	— 5
2.4 Fragilité, résilience, ténacité	— 5
2.5 Résistance à des sollicitations cycliques	— 6
2.6 Résistance à des températures élevées.....	— 6
2.7 Résistance à l'environnement	— 6
2.8 Autres propriétés	— 6
2.9 Niveaux de performances atteints par une bonne conception structurale des alliages.....	— 6
3. Obtention des états structuraux par traitement thermique	— 7
3.1 Origines et bases des traitements thermiques	— 7
3.2 Paramètres disponibles pour la réalisation des traitements thermiques	— 8
3.3 Grandes classes de traitements thermiques	— 8
4. Problèmes posés par les traitements thermiques	— 10
4.1 Distorsions et contraintes résiduelles dues aux gradients thermiques ..	— 10
4.2 Variations volumiques et contraintes résiduelles dues aux changements de phases	— 10
4.3 Altérations superficielles.....	— 10
4.4 Modifications structurales indésirables.....	— 11
4.5 Difficultés provenant de la précision de certains traitements thermiques	— 11
4.6 Difficultés du choix des conditions de traitement thermique.....	— 11
4.7 Coûts des traitements thermiques	— 12
4.8 Sécurité.....	— 12
4.9 Limites d'utilisation des pièces traitées.....	— 12
5. Relations entre les traitements thermiques et les procédés de fabrication	— 12
5.1 Traitements thermiques et moulage.....	— 12
5.2 Traitements thermiques des pièces frittées	— 12
5.3 Traitements thermiques et mise en forme par déformation plastique ...	— 12
5.4 Traitements thermiques et soudage	— 13
5.5 Traitements thermiques et usinage	— 13
5.6 Place des traitements thermiques dans une gamme de fabrication.....	— 13
5.7 Rôle des traitements thermiques sur le choix des matériaux et des procédés de fabrication.....	— 14
6. Conclusion	— 14
Références bibliographiques	— 14

La notion de traitements thermiques recouvre un ensemble d'opérations ayant pour but des transformations structurales effectuées sur les matériaux à l'état solide, sous l'influence de cycles de température convenablement choisis afin de leur conférer des propriétés particulières (NF A 02-010). Il peut s'y ajouter simultanément des traitements mécaniques (traitements thermo-mécaniques) ou des traitements chimiques (traitements thermo-chimiques).

On rencontre également des traitements thermiques au cours du refroidissement d'une pièce moulée après solidification et pendant des opérations de mise en forme par déformation plastique, par frittage ou par soudage, etc., quand des transformations structurales, sous l'influence des variations de température au cours de ces opérations, s'ajoutent à celles que ces procédés peuvent eux-mêmes provoquer.

1. Nécessité des traitements thermiques

1.1 Principes, buts et rôle des traitements thermiques

La plupart des matériaux sont susceptibles de subir des traitements thermiques. C'est ainsi que l'on peut modifier les structures des matières plastiques, des verres, des céramiques, mais ce sont les matériaux métalliques, métaux et alliages, qui offrent les plus grandes possibilités de traitements thermiques : on peut même dire que c'est grâce à eux que l'on peut en tirer le plus grand profit. L'importance commerciale des traitements thermiques est considérable.

Les modifications structurales obtenues par traitement thermique permettent, de conférer à un matériau des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisation sous forme de pièce finie, ou à sa mise en œuvre dans les meilleures conditions, sous forme de demi-produit ou d'ébauche. Ces améliorations contribuent très souvent à une diminution des coûts, car elles permettent l'emploi d'alliages bon marché quand on sait les traiter convenablement, ou la diminution du nombre de nuances à utiliser pour un type de fabrication donné, en choisissant un traitement bien adapté à chaque propriété recherchée.

Il faut préciser, dès à présent, que les traitements thermiques permettent une modification de *toutes* les propriétés des matériaux, car celles-ci sont toutes étroitement liées à leur structure : propriétés mécaniques, propriétés chimiques et de résistance à la corrosion, propriétés physiques diverses (électriques, magnétiques, etc.). On commence à bien comprendre les relations entre structure et propriétés, et, comme on peut maîtriser les évolutions structurales par traitement thermique, il est souvent possible d'obtenir ainsi les propriétés voulues.

Il s'agit, bien entendu, d'améliorer les propriétés des matériaux pour leur emploi mais, souvent, l'amélioration de l'une d'elles va généralement de pair avec une dégradation d'autres propriétés. Ainsi, une augmentation de dureté ou de résistance mécanique est toujours associée à un accroissement de la fragilité ou à une

diminution de la ductilité, et à l'altération de nombreuses autres propriétés, mais aussi à une diminution de l'usinabilité ou à une impossibilité d'emploi du matériau traité thermiquement pour le soudage par exemple. De même, un recuit permet en général d'augmenter la malléabilité et la facilité de mise en forme, mais diminue la dureté, la résistance mécanique et la résistance à l'usure, l'usinabilité pouvant être, selon le cas, améliorée ou diminuée.

Ce sont surtout les industries de pointe (aéronautique, nucléaire, essentiellement) et les industries de grande série (automobile) qui ont poussé au développement des performances des alliages et à la mise au point de traitements thermiques permettant d'atteindre ces performances. On rencontre alors, parmi les alliages traités thermiquement, des domaines d'application spécifiques.

Quand un alliage doit être utilisé sous des *sollicitations diverses et simultanées*, il est souvent nécessaire de faire des choix entre les propriétés et de faire des concessions à certaines d'entre elles. C'est ainsi qu'un acier traité à haute résistance est en général sensible à la corrosion sous tension, et que, dans le cas où un tel acier est soumis à ce type de corrosion, il convient de ne pas le traiter à son plus haut niveau de résistance mécanique ; l'emploi de cet acier pourra néanmoins se révéler plus intéressant, même s'il n'est pas traité à son niveau optimal de résistance.

Pour ces raisons, le choix d'un traitement thermique résulte souvent d'un *compromis* entre plusieurs propriétés contradictoires, les solutions sont souvent multiples, et le choix de la place des traitements thermiques dans une gamme de fabrication est d'une importance capitale.

1.2 Évolution historique des traitements thermiques

L'évolution des traitements thermiques s'effectue dans le sens d'une association de cycles de température à d'autres sollicitations : déformations plastiques, contraintes d'origines diverses, influence de l'environnement, en particulier emploi d'atmosphères spécifiques de chaque traitement et de chaque alliage, etc. Les traitements thermiques modernes pour les alliages performants comprennent souvent une succession complexe d'opérations très précises ; c'est dans les traitements thermiques des alliages d'aluminium qu'on en trouve une illustration spectaculaire. Il faut aussi ajouter l'évolution

vers des traitements thermiques superficiels ou localisés sur certaines parties de pièces, utilisant parfois des techniques physiques très récentes : laser, bombardement électronique par exemple.

Les progrès dans les traitements thermiques n'ont pu être obtenus que grâce aux développements de la physique des matériaux et à l'amélioration de la connaissance des mécanismes structuraux dont dépendent les diverses propriétés des matériaux. Ces progrès ont donc été étroitement liés à la découverte et au développement des appareils de laboratoire et des méthodes d'investigation de la structure des matériaux.

Nota : ces différentes méthodes d'analyse font l'objet d'articles spécialisés dans les traités *Analyse et Caractérisation d'une part, Électronique d'autre part.*

La mise au point en laboratoire de nouveaux traitements thermiques et de nouveaux alliages obtenant par traitement thermique des propriétés intéressantes ne peut généralement s'étendre aux conditions de fabrication industrielle qu'au prix de difficultés importantes. Les solutions industrielles dépendent beaucoup de la dimension, de la masse, de la quantité et de la fonction des pièces à traiter. Des pièces d'horlogerie, de très grande série, et ne pesant que quelques milligrammes, ne se traitent évidemment pas de la même façon que des pièces uniques de grosse mécanique ou de grosse chaudronnerie, pesant plusieurs centaines de tonnes.

Historique

L'utilisation des traitements thermiques pour améliorer la dureté et la résistance des alliages remonte à des temps reculés. Alors qu'à l'âge du cuivre c'est la composition des alliages qui détermine leurs qualités, à l'âge du fer, ce sont les traitements thermiques et les gammes de fabrication qui deviennent prédominants. C'est l'art et l'habileté des forgerons, entièrement fondés sur l'empirisme et dépourvus de tout moyen de contrôle précis, qui comptent le plus, si bien que les traitements thermiques sont restés très longtemps voilés de mystère, tenant plus de la magie que de la science.

La toute première industrie du fer a utilisé, à partir de 3 000 ans avant Jésus-Christ, du fer extrait des météorites : pourtant le lien étymologique entre le mot *sidérurgie* et le mot *sidéral* n'a pu être clairement établi, *σιδερος* signifiant *fer* en grec. Ce sont les Chalybes, en Asie Mineure, qui développèrent la sidérurgie et obtinrent involontairement, vers 1 000 ans avant Jésus-Christ, lors du réchauffage du métal dans du charbon de bois pour sa mise en forme, un acier suffisamment carburé pour pouvoir être durci par trempe. Mais ignorant l'origine de ce phénomène, et n'étant pas maîtres des facteurs qui le contrôlent, ils obtenaient des résultats inégaux pour la fabrication d'outils ou d'armes. Certaines épées se pliaient au combat, d'autres se brisaient brutalement. Certaines régions d'Europe centrale produisaient, vers 500 ans avant Jésus-Christ, des armes de qualité car elles disposaient de minerais chargés en manganèse fournissant des aciers de bonne trempabilité, même à faible teneur en carbone. Mais ce n'est qu'à l'époque romaine, vers 50 ans avant Jésus-Christ, qu'a été découverte l'influence bénéfique du revenu pour diminuer la fragilité de l'acier, et du recuit pour augmenter sa malléabilité et faciliter le travail du métal.

Historique

Les techniques de fabrication se sont perfectionnées au V^e siècle, à partir de l'époque mérovingienne où se sont développées les épées damassées par soudure. Les traitements thermiques deviennent plus reproductibles et l'on voit apparaître la cémentation, la carbonituration et même la nitruration des tranchants rapportés par soudure, cimentés, trempés et nitrurés. Avec une structure martensitique, la dureté peut atteindre 610 Vickers. Les techniques métallurgiques n'évoluent alors plus guère jusqu'au XVIII^e siècle et restent surtout fondées sur l'expérience et le sens de l'observation : elles restent toujours très mystérieuses. Les forgerons ne réussissent alors leurs fabrications que grâce à des tours de main acquis par la pratique et qui les font comparer alors tantôt à des dieux, tantôt à des démons, et à cette époque les épées des héros portent toutes un nom.

C'est au début du XVIII^e siècle que Réaumur entreprit d'importantes recherches sur les traitements thermiques des aciers et des fontes [1] : trempe, revenu, cémentation, nitruration des aciers et recuit des fontes blanches permettant l'obtention de fonte malléable à cœur blanc. C'est lui qui inaugura l'utilisation du microscope pour l'étude de la constitution des métaux, et fonda ainsi la métallographie.

Cependant, il y a une centaine d'années, on ne maîtrisait pas encore convenablement les traitements thermiques des aciers, et l'on peut lire, dans un ouvrage de 1874 [2] : « Chaque fois que cela sera possible, on fera bien de donner aux pièces en acier la dureté désirée, par la teneur en carbone plutôt que par la trempe qui est un moyen irrégulier, brutal, dont il est difficile de prévoir l'énergie ». Ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle que commença à se développer, de façon approfondie et rationnelle, la connaissance des phénomènes métallurgiques à l'état solide, particulièrement en France avec les travaux de Osmond, Le Chatelier, Charpy, Guillet, Portevin, Chevenard et Guinier.

Mais, si les traitements thermiques ont été appliqués aux aciers depuis longtemps, ils ne se sont développés, pour les fontes, que plus tard (obtention de la fonte malléable à cœur noir au début du XX^e siècle), et ce n'est que plus récemment encore que l'on a développé les traitements thermiques des autres alliages. Des progrès considérables sur les propriétés des alliages modernes ont été obtenus par la mise au point des traitements thermiques de durcissement par précipitation, de conception beaucoup plus originale, qui se sont développés à partir de l'étude des *duralumins*, alliages d'aluminium conçus en Allemagne, à Düren (d'où leur nom), et étudiés depuis 1910 seulement. Néanmoins, ces traitements thermiques de durcissement par précipitation n'ont été compris et maîtrisés que beaucoup plus récemment, à partir de 1935, grâce en particulier aux études entreprises par Guinier au moyen d'appareils scientifiques sophistiqués. Les traitements thermiques se sont ensuite développés pour les aciers inoxydables et les alliages réfractaires, les alliages de magnésium, les alliages de cuivre et, depuis une vingtaine d'années seulement, pour les aciers à haute résistance du type maraging et les superalliages à base nickel ou cobalt.

2. Conception structurale des métaux et alliages

2.1 Relations entre la structure et les propriétés

Les mécaniciens, et les constructeurs en général, s'intéressent à la résistance des matériaux qu'ils considèrent sous leur aspect macroscopique et qu'ils supposent homogènes. Ils ont développé en ce domaine un appareil mathématique puissant pour calculer les relations entre contraintes, déformations et propriétés mécaniques des matériaux. Les métallurgistes, chargés de concevoir et de fabriquer les matériaux métalliques, s'intéressent également à leurs propriétés macroscopiques, mais surtout au moyen de les obtenir. Pour cela ils ont découvert que les matériaux sont souvent hétérogènes et anisotropes, et ils ont appris que les propriétés mécaniques des matériaux dépendent essentiellement, outre de leur nature et de leur composition, de leur structure interne, tant micrographique que cristalline : leurs préoccupations principales sont donc de comprendre les relations entre la structure interne et les propriétés, ce qui leur permet de les contrôler et, mieux, de les améliorer, mais aussi d'imaginer de nouveaux matériaux. Les physiciens savent aussi que toutes les autres propriétés des matériaux (électriques, magnétiques, thermiques, optiques, résistance à la corrosion, etc.) dépendent de leur structure électronique, cristalline et micrographique : au métallurgiste de réaliser les matériaux ayant les propriétés convenables.

C'est surtout la structure micrographique qui permet, pour un alliage donné, de faire varier ses propriétés dans une plage de valeurs étendue. Les paramètres structuraux les plus importants sont : la structure cristalline, l'hétérogénéité chimique, les inclusions non métalliques, la morphologie des différentes phases, la taille des grains en particulier, le taux d'écroutissage, la texture, les contraintes résiduelles (internes ou superficielles), les défauts internes et superficiels (tableau 1).

La structure micrographique est liée aux procédés d'élaboration, mais surtout aux conditions dans lesquelles les procédés de mise en forme sont utilisés. Elle peut être profondément modifiée par des traitements thermiques. En effet, les modifications structurales apportées par les procédés de mise en forme sont parfois favorables aux propriétés (écroutissage par exemple), mais présentent la plupart du temps certains inconvénients que les traitements thermiques peuvent souvent effacer. Toutefois, certains d'entre eux ne sont pas toujours réparables : par exemple, le fibrage apporté par le forgeage ou le filage, qui abaisse la résistance dans le sens travers, est indélébile ; les textures apportées par une déformation à froid, bien qu'elles puissent être modifiées, sont toujours à l'origine d'une certaine anisotropie souvent gênante.

Certaines propriétés sont relativement simples à relier à la structure micrographique, mais à la complexité d'un grand nombre d'entre elles s'ajoutent des possibilités d'évolution en fonction de paramètres physiques comme la température ou le temps qui, étant à la base même des traitements thermiques, jouent beaucoup sur l'évolution des structures micrographiques. On parle d'ailleurs dans certains cas de *vieillessement des alliages*. C'est par l'évolution du comportement, à l'échelle micrographique ou cristalline, en fonction de la température, que l'on peut expliquer son rôle sur certaines propriétés, ce qui impose des conditions d'emploi particulières de certains alliages.

Une autre difficulté dans l'étude des relations entre structure et propriétés tient à ce que, si de nombreuses propriétés sont intrinsèques au matériau et liées à sa structure, d'autres dépendent essentiellement de l'environnement. Alors que les premières sont généralement bien connues, les dernières sont souvent difficiles à bien connaître.

Les sollicitations que subissent les matériaux font intervenir des propriétés très différentes selon qu'elles sont statiques, dynamiques, ou cycliques. Les sollicitations statiques font intervenir générale-

Tableau 1 – Relations entre propriétés et éléments structuraux des alliages (1)

Propriétés	Éléments structuraux											
	Pureté - Homogénéité	Structure cristalline	Structure micrographique	Texture	Inclusions étrangères	État de surface	Contraintes résiduelles	Contraintes superficielles de compression	Défauts internes	Défauts superficiels	Forme des pièces	Tolérance dimensionnelle
Résistance mécanique	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+
Dureté	-	+	+		+		+	+				
Malléabilité Allongement	+	+	+	+	-				-	-		
Résilience (résistance au choc)		+	+	+	-		-		-		+	
Ténacité (résistance en présence d'un défaut)			+	+	-		-	+	-	-	+	
Fatigue	+		+		-	+	-	+	-	-	+	+
Fluage	-		+	+	-				-			
Utilisation aux basses températures		+	+		-		-	+				
Résistance à l'oxydation à haute température											-	
Résistance à la corrosion et à l'oxydation	+				-	+		+		-	+	
Propriétés électriques (isolant ou conducteur)	+											
Propriétés magnétiques			+	+	+		+					
Propriétés thermiques												
Densité												
Propriétés superficielles Aspect						+		+		-		+
Stabilité dimensionnelle	+	+					-	-			+	

(1) Le signe + repère les éléments structuraux favorables dont on pourra profiter pour améliorer telle ou telle propriété. Le signe - repère les éléments structuraux qu'il faudra éviter le plus possible si l'on désire obtenir une bonne résistance mécanique ou une bonne ténacité, etc.

ment des propriétés mieux connues et elles sont souvent moins dangereuses que les sollicitations dynamiques ou cycliques. Mais cela ne s'explique pas tant par le comportement structural du matériau que par la plus grande difficulté de calculer, par exemple, la répartition des contraintes.

2.2 Mécanismes structuraux contrôlant les propriétés des métaux et alliages

Il est impossible, dans l'état actuel de nos connaissances, de traiter théoriquement, dans son ensemble, l'étude des mécanismes structuraux intervenant sur les propriétés : il n'existe pas d'équations générales de base, simples, comme en mécanique ou en résistance des matériaux. Il y a, en effet, trop de paramètres, trop de mécanismes et trop de conditions de sollicitations qui font intervenir de multiples propriétés, pour que le problème puisse se traiter de façon simple. Il convient surtout de faire ressortir des concepts et des modèles qui pourront guider le raisonnement qui permettra de concevoir la structure d'un matériau la mieux adaptée à chaque besoin. Néanmoins, le support de certaines équations sera parfois une aide appréciable pour prévoir le sens de variation des propriétés, leur ordre de grandeur mais rarement leur valeur précise.

Les quelques relations mathématiques simples et bien connues entre des paramètres structuraux et la résistance mécanique des alliages concernent le rôle de la taille de grain, ou d'une dispersion de précipités ou de particules étrangères dans un alliage. Ce sont [4] [11] :

— la loi de Petch :

$$R_e = R_{e_0} + k_e \cdot d^{-1/2}$$

montrant le rôle de la taille de grain sur la limite d'élasticité R_e (R_{e_0} limite d'élasticité d'un monocristal ; k_e constante ; d diamètre moyen des grains) ;

— la loi de variation de la température de transition ductile-fragile T_c , en fonction de la taille moyenne des grains d :

$$T_c = k - \beta \cdot d^{-1/2}$$

où k et β sont des constantes ;

— la formule d'Ashby :

$$R_e = R'_e + \frac{\alpha \mu b}{D - 2r} \ln \left(\frac{D - 2r}{b} \right)$$

pour les alliages durcis par précipitation, où R_e est la limite d'élasticité d'un alliage dont la matrice a une limite d'élasticité R'_e et est renforcée par une dispersion de précipités de diamètre moyen $2r$, distants en moyenne de D ; les dislocations ont un vecteur de Burgers b ; μ est le module de cisaillement de la matrice et α une constante.

2.3 Résistance à des sollicitations mécaniques statiques à température ambiante

Un des plus importants soucis des métallurgistes est la recherche d'alliages possédant une résistance mécanique de plus en plus élevée, dans les conditions normales d'utilisation, à la température

ambiante. Dans ce but, on cherche à élever la limite d'élasticité et la dureté, et à rendre la déformation plastique plus difficile. Celle-ci se produisant par glissement des dislocations dans les grains du métal, il convient de rechercher les éléments structuraux qui rendent ces glissements plus difficiles. Le durcissement peut donc être obtenu :

- en gênant les glissements des dislocations par des obstacles :
 - inclusions,
 - précipités,
 - joints de grains (*affinement du grain*) ;
- en stabilisant ou en repoussant les dislocations par des contraintes résiduelles internes qui peuvent provenir :
 - de la présence d'atomes étrangers dans le réseau cristallin du métal de base (*effet de solution solide*),
 - de la présence de défauts cristallins en grand nombre (autres dislocations, fautes d'empilement), apportés par une déformation plastique préalable (*effet d'écrouissage*),
 - de la formation d'une nouvelle phase dans l'alliage solide, par sa cohérence avec le réseau cristallin de la phase initiale (*précipitation*), ou par son volume massique différent, ou par un effet de sursaturation de cette phase en raison de ses conditions particulières de formation (*trempe martensitique des aciers*).

Enfin, certaines structures cristallines sont, par nature, plus malléables que d'autres (par exemple cubique à faces centrées) ou au contraire plus dures (cas général des phases ordonnées, des phases intermédiaires et des composés définis).

2.4 Fragilité, résilience, ténacité

Malheureusement, une plus grande résistance mécanique d'un alliage s'accompagne presque toujours d'une plus grande fragilité ou d'un allongement à la rupture plus faible. Il en résulte une résistance au choc ou une résilience très basse, ou une possibilité de fissuration sous l'effet de concentrations de contraintes locales, ce qui apporte un certain risque à l'utilisation. Dans les rares cas où l'augmentation de résistance mécanique ou de dureté n'est pas assortie d'une baisse de résilience, on possède alors des alliages particulièrement séduisants. Il est à noter que les alliages durcis par précipitation et constitués d'une matrice continue, suffisamment malléable, dans laquelle sont répartis les précipités durcissants, possèdent en général un allongement à la rupture satisfaisant pour un niveau de résistance mécanique élevé.

Dans cet ordre d'idées, la résistance à l'usure peut être améliorée par un durcissement superficiel qui ne conduira pas à une fragilité excessive de la pièce dans son ensemble, celle-ci n'étant pas durcie à cœur.

Il est, par contre, très difficile de définir les paramètres structuraux nécessaires à une bonne ténacité (ou résistance à la propagation brutale d'une crique). Cette propriété varie en général dans le même sens que la résilience. Elle nécessite surtout un alliage sans inclusions, avec, entre autres, une valeur élevée du coefficient d'écrouissage et un bon allongement à la rupture.

La recherche d'une structure permettant un durcissement et un accroissement de la résistance mécanique n'est, très souvent, pas suffisante pour assurer une bonne tenue en service des pièces métalliques quand interviennent des effets cycliques et les effets de l'environnement (température, corrosion, etc.), qui conduisent tous deux à une évolution de la structure des pièces ou des matériaux.

2.5 Résistance à des sollicitations cycliques

Sous **effort cyclique**, une pièce métallique peut se rompre par fatigue, sans que les efforts qui lui sont appliqués ne dépassent jamais globalement la limite d'élasticité du métal : il y a initiation d'une fissure, puis propagation à chaque cycle, la rupture survenant quand la fissure devient trop grande. Cet effet, bien connu, peut être en grande partie limité en contrôlant la structure, soit pour retarder l'amorçage, soit pour ralentir la propagation des fissures.

- La résistance à l'amorçage peut être améliorée par :
 - une élévation de la charge de rupture (on recherche les éléments structuraux qui permettent un durcissement de l'alliage mais, parmi ceux-ci, il est préférable d'éviter la présence de précipités, d'inclusions, de défauts, en général de tout ce qui peut provoquer des concentrations de contraintes locales) ;
 - un durcissement superficiel ou une amélioration de l'état de surface car c'est souvent à la surface des pièces que s'initient les fissures ;
 - la création de contraintes résiduelles superficielles de compression.
- La propagation des fissures peut être ralentie par :
 - une diminution de la taille de grains ;
 - un contrôle de la quantité d'inclusions, du fibrage et des précipités.

2.6 Résistance à des températures élevées

La résistance mécanique des alliages est moindre à haute température en raison de l'agitation thermique et ils peuvent se déformer, par **fluage**, sous une charge inférieure à leur limite d'élasticité, au-delà d'une température de l'ordre de 40 % de leur température absolue de fusion. Les paramètres structuraux qui contrôlent la résistance au fluage sont bien connus : la déformation par fluage fait intervenir tout d'abord, grâce aux lacunes, la montée des dislocations qui peuvent ainsi contourner leurs obstacles, puis leur coalescence aux joints de grains où se forment alors des fissures. Il convient donc, dans les alliages résistant au fluage :

- de multiplier les obstacles aux dislocations (précipités, inclusions) ;
- de ralentir le déplacement des dislocations (par des atomes en solution solide) ;
- de diminuer le nombre de joints de grains en augmentant la taille des grains et de supprimer ceux qui sont perpendiculaires aux efforts ;
- de choisir une structure suffisamment stable et qui n'évolue pas au cours du temps, en raison de l'agitation thermique importante à haute température : la température d'emploi des alliages résistant au fluage est toujours limitée à une valeur supérieure qui dépend de leur mode de durcissement.

Le grossissement du grain des alliages travaillant à haute température, ou au cours d'un soudage prolongé, abaisse en outre leur résistance mécanique et élève la température de transition ductile-fragile pour les alliages présentant ce phénomène, en rendant l'emploi particulièrement dangereux à de trop basses températures. Parmi les éléments structuraux ralentissant le grossissement du grain, les éléments d'addition et les inclusions étrangères sont particulièrement favorables.

2.7 Résistance à l'environnement

La tenue en service des pièces métalliques est souvent affectée par la **corrosion** et l'**oxydation**. En dehors de la résistance propre de certains métaux ou de certains alliages à ce type de sollicitation, ce sont les hétérogénéités structurales de toutes natures (composition, défauts de structure, contraintes résiduelles, etc.) qui affectent le plus la résistance à la corrosion. C'est ainsi que l'on rencontre le cas très fréquent, dans de nombreux alliages, de la **corrosion intergranulaire** provenant d'une précipitation préférentielle aux joints de grains et d'un appauvrissement en certains éléments de la région voisine, par rapport aux grains eux-mêmes. Cette corrosion très insidieuse peut être évitée par des traitements thermiques, mais elle peut aussi être provoquée par des durcissements, de préférence superficiel, exécutés, ou par un soudage. La **corrosion sous tension**, quant à elle, peut être favorisée par la présence de contraintes résiduelles superficielles de traction, et les alliages à haute limite d'élasticité y sont particulièrement sensibles.

Une autre cause de ruine des pièces métalliques, liée à leur environnement, est l'usure par frottement, abrasion, cavitation, etc. Elle est en général limitée par un durcissement, de préférence superficiel. Certains alliages sont, à cet égard, très attractifs, comme les aciers **Hadfield** car ils durcissent beaucoup, par écrouissage, à la faveur d'une transformation martensitique, ce qui se produit précisément en surface par l'effet de l'abrasion et des chocs superficiels.

2.8 Autres propriétés

Parmi les autres propriétés, les caractéristiques électriques et surtout magnétiques sont le plus influencées par la structure des métaux et alliages. Des éléments étrangers et les défauts cristallins, surtout les lacunes, ainsi qu'un accroissement du désordre des solutions solides ordonnées, diminuent la conductivité électrique. C'est par un contrôle précis de la structure micrographique que l'on peut ajuster de façon très précise les propriétés magnétiques : on fait intervenir la composition, la nature des phases, leur morphologie, le taux de défauts, les contraintes résiduelles, la texture, pour obtenir des matériaux magnétiques à caractéristiques particulières (matériaux pour aimants, ou à faible perméabilité magnétique, ou à très faible cycle d'hystérésis, etc.).

Outre les propriétés des matériaux leur assurant une bonne tenue en service, il faut aussi considérer leur aptitude à la mise en œuvre : elle est examinée dans le paragraphe 5.

2.9 Niveaux de performances atteints par une bonne conception structurale des alliages

C'est en améliorant la conception structurale des alliages que les métallurgistes ont pu, au fil des ans, faire progresser leurs performances. Par exemple, quand la taille de grains diminue ([§ 2.2](#)) ou quand la finesse de la structure augmente, on constate un accroissement spectaculaire de la résistance mécanique des alliages. La figure 1 montre cet effet pour les aciers. En affinant la structure de la perlite pour un acier, on peut aisément tripler sa dureté. Les aciers les plus résistants actuellement connus sont des aciers **austénitiformés** dont la structure est extrêmement fine : leur charge de rupture dépasse 3 000 MPa.

3. Obtention des états structuraux par traitement thermique

3.1 Origines et bases des traitements thermiques

Les traitements thermiques, ayant pour but des modifications de structure d'une part, et de la morphologie de cette structure d'autre part, sont donc fondés respectivement sur les possibilités d'évolution structurale des métaux et alliages, et sur les mécanismes de ces évolutions.

L'existence de transformations à l'état solide dans les métaux et alliages peut être connue en consultant les *diagrammes de phases* correspondants (article *Diagrammes d'équilibre. Alliages binaires* [M 70] dans ce traité). Il faut noter que les *diagrammes d'équilibre* ne suffisent pas, en général, pour connaître toutes les possibilités de transformation à l'état solide, car certaines d'entre elles ne s'effectuent pas dans les conditions d'équilibre et ne conduisent pas non plus toujours à des structures ou à des phases d'équilibre. Les phases obtenues peuvent donc être *stables* ou *métastables*; ces dernières n'existent pas dans les diagrammes d'équilibre, ou alors se rencontrent à l'extérieur de leur domaine normal de température et de composition.

Il faut distinguer deux classes de transformations à l'état solide :

— les transformations qui correspondent à de véritables changements de phases avec modification des structures cristallines ou atomiques :

- transformations allotropiques dans les métaux purs ou les alliages,
- transformation eutectoïde,
- transformation péritectoïde,
- précipitation dans une phase qui devient sursaturée à partir d'une certaine température, ou, inversement, redissolution d'une phase précipitée ou dispersée,
- transformation ordre-désordre, bien qu'il n'y ait pas modification de la structure cristalline,
- transformation magnétique correspondant à des modifications au niveau des atomes eux-mêmes, sans modification à l'échelle de la répartition des atomes dans le réseau cristallin ;
- les transformations qui correspondent à l'évolution progressive des phases de l'alliage ou de leur morphologie, sans changement de structure cristalline :
 - homogénéisation d'une phase hétérogène,
 - relaxation ou détente des contraintes résiduelles,
 - diminution du taux de défauts par restauration et recristallisation,
 - formation d'une texture d'orientation préférentielle,
 - grossissement du grain,
 - globulisation ou coalescence de certaines phases.

Les **mécanismes de ces transformations**, qui contrôlent leur évolution, sont souvent sensibles à la structure micrographique des phases : par exemple, l'apparition d'une nouvelle phase dans une phase solide est, la plupart du temps, facilitée sur les joints de grains et sur les défauts (dislocations, fautes d'empilement). Souvent aussi, ils sont liés à la structure cristallographique ou à la texture, la phase nouvelle qui apparaît étant fréquemment en relation cristallographique précise avec la phase initiale (transformation martensitique, précipitation continue, recristallisation, par exemple).

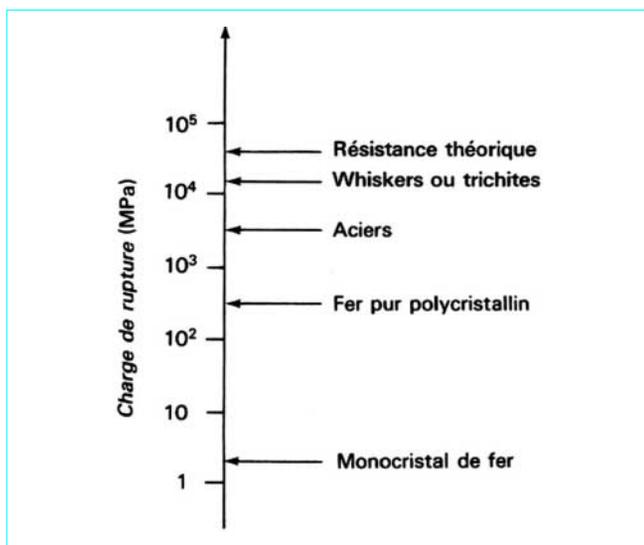


Figure 1 – Influence de la structure des alliages sur leur résistance mécanique

De nombreux alliages modernes, durcis par précipitation, atteignent des niveaux de performance remarquables : c'est ainsi, par exemple, que le cuivre, dont la résistance mécanique est relativement médiocre, allié à 2 % de béryllium, écroui et durci par précipitation, peut atteindre une charge de rupture de 1 450 MPa avec une limite d'élasticité de 1 250 MPa et un allongement à la rupture de 4 %, valeurs qui ne le cèdent en rien à celles de certains aciers à haute résistance. Parmi les aciers, on rencontre les aciers *maraging*, eux aussi durcis par précipitation, dont la charge de rupture atteint 2 500 MPa avec une limite d'élasticité de 2 400 MPa et un allongement à la rupture de 6 %. C'est grâce à une conception structurale analogue qu'ont été mis au point les *superalliages* à base nickel ou cobalt à haute résistance mécanique à chaud et surtout remarquablement résistants au fluage, sans lesquels n'auraient jamais pu être mis au point les réacteurs pour l'aviation.

C'est par une conception structurale nouvelle, fondée sur les propriétés des structures martensitiques, qu'ont été découverts des alliages possédant des propriétés exceptionnelles inconnues autrefois (alliages à mémoire, alliages superélastiques). Des structures originales ont été mises au point pour faciliter certains procédés de fabrication : c'est le cas par exemple des tôles d'acier *dual phase* ayant une emboutissabilité remarquable pour une résistance mécanique plus élevée que celle des aciers ordinaires.

Le principe d'une conception structurale d'ensemble se rencontre dans les traitements superficiels qui permettent souvent de conférer aux pièces mécaniques des propriétés multiples impossibles à obtenir quand elles ne sont pas compatibles entre elles dans une phase unique (exemple de la dureté et de la résilience pour des pièces durcies superficiellement).

Un autre type de performance, dont l'intérêt est considérable, concerne l'abaissement des coûts et l'amélioration de la sécurité d'emploi. Ces objectifs sont couramment atteints par l'emploi de traitements superficiels.

Chaque transformation dépend d'un mécanisme où la température à laquelle elle se produit joue un rôle fondamental. Ainsi, de nombreuses transformations sont *activées thermiquement* (diffusion, croissance des grains, coalescence, etc.). Inversement, une baisse trop rapide de température peut complètement les inhiber : c'est le principe des trempes. D'autres, dites *athermiques*, ont une cinétique qui n'est pas influencée par la température, l'évolution de la transformation étant néanmoins liée à la variation de la température : c'est le cas des transformations *martensitiques*.

Le mécanisme de certaines transformations est tel qu'elles peuvent être facilitées par l'application de contraintes ou par une déformation plastique : c'est aussi le cas des transformations martensitiques.

3.2 Paramètres disponibles pour la réalisation des traitements thermiques

Les paramètres que l'on peut utiliser pour la réalisation des traitements thermiques sont ceux qui caractérisent l'existence des différentes phases d'un même alliage, les transformations entre elles et les mécanismes de ces transformations. Le rôle de la *température* et du *temps* s'impose largement parmi ces paramètres qui sont les suivants :

- composition chimique globale de l'alliage ;
- hétérogénéités chimiques locales à l'échelle de la structure micrographique (à l'échelle des grains ou des défauts cristallins) ;
- hétérogénéité chimique à l'échelle d'une pièce métallique (enrichissement ou appauvrissement superficiel en certains éléments, macroségrégation) ;
- structure micrographique de l'alliage (morphologie des phases, phases dispersées) ;
- texture de l'alliage ;
- atmosphère ou milieu de traitement pour éviter ou favoriser des modifications de composition superficielle (protection contre l'oxydation ou traitements superficiels) ;
- température de traitement ; elle est le plus souvent supérieure à la température ambiante, mais peut parfois être inférieure (destabilisation de l'austénite résiduelle dans les aciers) ;
- vitesses de chauffage jusqu'à la température de traitement et de refroidissement depuis cette température : elles dépendent beaucoup de la taille des pièces à traiter et plus précisément de la diffusivité thermique du matériau, elles ne peuvent donc pas toujours être librement choisies ;
- temps de séjour à la température de traitement ;
- profondeur chauffée (pour les traitements thermiques superficiels) ;
- cycles thermiques complexes faisant intervenir de multiples combinaisons température-temps (trempes isothermes, etc.) ;
- écrouissage, conduisant à une modification du taux de défauts cristallins ;
- contraintes résiduelles, internes ou superficielles ;
- contraintes ou déformations appliquées pendant le traitement ;
- champ magnétique appliqué pendant le traitement thermique de certains aimants ;
- champ électrique appliqué pour la nitruration ionique ou la cémentation sous vide.

Dans la recherche d'une amélioration des caractéristiques des alliages, obtenues par traitement thermique, le choix des paramètres joue évidemment un rôle capital et l'on s'aventure désormais dans des domaines autrefois interdits comme le traitement dans le domaine de brûlure pour les alliages d'aluminium, ou le laminage dans des domaines biphasés pour les aciers, par exemple.

3.3 Grandes classes de traitements thermiques

Il existe une grande variété de traitements thermiques différents, définis à l'aide des paramètres indiqués précédemment (§ 3.2), mais ils peuvent être regroupés en cinq grandes classes principales.

3.3.1 Recuits

Le rôle principal d'un recuit est de conférer à l'alliage une structure le plus proche possible de sa structure d'équilibre.

■ Les recuits ont les fonctions suivantes :

- homogénéiser un alliage du point de vue tant chimique que micrographique : c'est, par exemple, le cas des alliages moulés, hétérogènes et de taille de grains non uniforme ;
- modifier sa structure micrographique, par exemple par coalescence d'une phase ou par affinement du grain (normalisation) ;
- restaurer la structure d'un alliage après écrouissage, soudage, ou traitement thermique antérieur ;
- diminuer les contraintes internes (relaxation).

■ Les buts des recuits sont principalement les suivants :

- adoucissement favorisant la mise en forme par déformation plastique ou par usinage ;
- préparation de l'alliage avant un autre traitement thermique ;
- stabilisation de l'alliage, surtout d'un point de vue dimensionnel, mais aussi pour améliorer sa résistance aux efforts mécaniques ou à la corrosion.

On précise souvent, dans la dénomination d'un recuit, soit le but dans lequel il est effectué (homogénéisation, régénération, normalisation, coalescence, restauration, recristallisation, adoucissement, détente, relaxation, dégazage, etc.), soit le moyen employé ou les conditions choisies pour l'effectuer (en pot, en caisse, au passage, au défilé, à la volée, isotherme, brillant, blanc, noir, bleu, etc.).

Un recuit se réalise par chauffage à une vitesse choisie, avec éventuellement des paliers de température progressifs jusqu'à une température déterminée en fonction du but recherché. La température de recuit étant atteinte, on effectue un maintien isotherme ou des oscillations autour de cette température, pendant un temps déterminé également en fonction du but recherché. Le refroidissement a lieu à une vitesse choisie en fonction de la nature de l'alliage, parfois selon un programme soigneusement contrôlé. Cette vitesse est relativement lente pour rester en permanence le plus proche possible des conditionnements d'équilibre. Elle peut être aussi faible que quelques degrés par heure pour certains aciers.

Les phénomènes se produisant pendant le recuit étant thermiquement activés, le temps de recuit est d'autant plus court que sa température est élevée. De même, la structure micrographique obtenue après recuit est d'autant moins fine que la température de recuit est plus élevée, le temps de maintien plus long et le refroidissement moins rapide. Quand il s'agit de recuit d'homogénéisation, celui-ci peut s'effectuer en un temps d'autant plus court et à une température d'autant plus basse que la structure micrographique est plus fine, ou l'alliage plus homogène. C'est ainsi que les pièces moulées, où les phénomènes de ségrégation sont souvent importants, nécessitent des températures de recuit plus élevées ou des temps de recuit plus longs que des pièces corroyées (filées, forgées, etc.).

3.3.2 Trempes

Le rôle d'une trempe est généralement, à l'inverse des recuits, de permettre d'obtenir des structures hors d'équilibre dans les conditions où on les rencontre, à l'échelle aussi bien cristalline que micrographique.

■ Les différentes trempes sont fondées sur les principes suivants :

- conserver à plus basse température une phase qui n'est stable qu'à plus haute température et qui, lors d'un refroidissement suffisamment rapide, n'a pas le temps d'évoluer vers la structure d'équilibre ;
- éviter certaines transformations conduisant à des structures d'équilibre, qui n'ont pas le temps de se produire au cours du refroidissement trop rapide, ce qui favorise alors d'autres transformations conduisant à des structures le plus souvent hors d'équilibre.

■ Les trempes sont effectuées dans les buts suivants :

- conserver un élément en sursaturation pour augmenter la résistance mécanique ou préparer un durcissement ultérieur par revenu, ce qui est la base du traitement de durcissement par précipitation d'un grand nombre d'alliages ;
- obtenir une phase hors d'équilibre aux propriétés plus favorables que la structure d'équilibre, soit par conservation de la phase initiale (austénite retenue par hypertrempe d'un acier inoxydable, par exemple), soit par transformation hors d'équilibre (martensite des aciers, par exemple) ; cette opération peut être entreprise aussi bien dans un but de durcissement (martensite des aciers au carbone) que de malléabilisation (austénite des aciers inoxydables).

Le traitement de trempe comporte d'abord un chauffage, dans des conditions semblables à celles des recuits, à une température généralement déterminée grâce aux diagrammes d'équilibre, pour atteindre une structure d'équilibre. Cette exigence nécessite un maintien suffisant à la température de trempe afin d'obtenir une structure homogène, à température uniforme, mais il est en général de durée plus courte que celle des recuits ; cette durée est évidemment d'autant plus grande que la taille de la pièce à tremper est plus importante. Le refroidissement depuis la température de trempe s'effectue alors avec une vitesse supérieure à une vitesse critique caractéristique de l'alliage trempé, par immersion dans un milieu convenablement choisi pour assurer le refroidissement désiré (air, gaz neutre, eau, huile, bains de sels). La température de ce milieu, soigneusement contrôlée et souvent homogénéisée par agitation mécanique, est généralement voisine de la température ambiante, mais peut lui être supérieure, et parfois inférieure.

L'effet de taille des pièces joue, au refroidissement, un rôle encore plus considérable qu'au chauffage. En effet, en raison de la diffusivité thermique médiocre de la plupart des alliages à traiter, en particulier des aciers, il est primordial de s'assurer que le refroidissement en chaque point d'une pièce de grande taille est suffisamment sévère et, en toute rigueur, qu'il s'effectue partout à une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe. Pour de très grosses pièces, cette nécessité peut rendre impossible le traitement de trempe à cœur, ou encore imposer le choix d'un alliage différent ayant une vitesse critique de trempe plus faible.

3.3.3 Revenus

Un revenu a pour rôle essentiel de faire évoluer une structure hors d'équilibre, obtenue par trempe, vers un état proche de l'équilibre. Le revenu s'effectue à température modérée inférieure à la température de trempe et à celle de recuit, pendant des durées limitées. Le plus souvent, il ne permet donc pas d'atteindre l'état d'équilibre obtenu par recuit. La nature des phases obtenues et leur composition sont en général voisines de celles obtenues par recuit, mais la structure micrographique est considérablement plus fine, ce qui, associé

au mécanisme particulier d'évolution des phases pendant le revenu, confère aux alliages revenus une résistance mécanique considérablement plus élevée que celle des mêmes alliages recuits.

Il existe, comme pour les recuits, des équivalences entre le temps et la température de revenu, que l'on regroupe généralement sous la forme d'une formule définissant un paramètre de revenu fonction de la température et du temps. Tous les couples de température et de temps qui confèrent à ce paramètre la même valeur sont équivalents et correspondent à une même évolution structurale. Mais un tel paramètre n'est valable que dans un domaine limité de température correspondant à un type particulier d'évolution structurale, celle-ci pouvant être différente pour des températures de revenu différentes.

Suivant l'évolution structurale qui en découle, les revenus ont les buts suivants :

- durcissement par précipitation dans une phase sursaturée (alliages d'aluminium, par exemple) ou par décomposition d'une phase métastable, obtenue par trempe (austénite des aciers, par exemple) ;
- adoucissement d'une phase trop fragile obtenue par trempe (cas de la martensite des aciers au carbone) ;
- relaxation des contraintes résiduelles après trempe, sans évolution structurale.

Après trempe, certaines évolutions structurales peuvent s'effectuer spontanément vers l'état d'équilibre à la température ambiante : c'est le cas de la *maturation* des alliages d'aluminium ou du *vieillessement* de certains aciers doux. Une accélération de ces phénomènes peut être obtenue par une légère augmentation de température au cours d'un vieillissement *accéléré*.

3.3.4 Traitements thermochimiques

Dans les traitements thermochimiques, on modifie superficiellement la composition des alliages pour obtenir en surface une composition qui soit confère par elle-même à l'alliage traité, sous forme de pièce pratiquement finie, une dureté superficielle élevée, soit permet, après traitement thermique complémentaire, d'atteindre uniquement en surface la dureté recherchée, afin, dans les deux cas, de conserver à l'ensemble de la pièce une résilience ou une ténacité suffisante. Les transformations réalisées en surface permettent en outre, le plus souvent, de faire naître des contraintes superficielles de compression très favorables à la tenue en service des pièces traitées (résistance à la fatigue principalement).

Historiquement, c'est l'enrichissement en carbone des aciers qui est le plus ancien, mais on utilise de nombreux autres éléments dans les traitements les plus modernes, sur de nombreux alliages. On rencontre principalement les traitements suivants :

- traitements thermochimiques suivis de traitement thermique :
 - cémentation (carbone),
 - carbonituration (carbone et azote) ;
- traitements thermochimiques habituellement non suivis de traitements thermiques :
 - nitruration (azote),
 - chromisation (chrome),
 - boruration (bore),
 - etc.

Les éléments d'enrichissement sont apportés par la dissociation à la surface de l'alliage de composés de ces éléments, contenus soit dans une atmosphère gazeuse, soit dans un mélange liquide de bains de sels. Des traitements thermochimiques sont également effectués dans un milieu solide en poudre, mais le transfert des éléments intéressants à la surface du métal s'effectue grâce à l'atmosphère obtenue par réaction avec le solide utilisé (cémentation en caisse, chromisation, etc.).

3.3.5 Traitements thermomécaniques

L'association d'un traitement thermique et simultanément d'une déformation plastique mécanique a conduit au développement récent des traitements thermomécaniques, principalement pour les aciers, mais aussi pour d'autres alliages. Ces traitements concernent surtout des demi-produits (tôles, fils, par exemple) et peuvent conférer aux matériaux ainsi traités des résistances mécaniques exceptionnelles, car ils associent, au niveau structural, une amélioration des propriétés mécaniques par traitement thermique proprement dit et un affinement de la structure micrographique par la déformation plastique qui, en outre, favorise souvent les transformations. C'est le cas de l'austénito-formage de certains aciers écrouis à l'état austénitique avant trempe, du laminage contrôlé des aciers, etc. Pour certains alliages, on peut obtenir, par forgeage à chaud et recristallisation simultanée, la globulisation de certaines phases, ce qui améliore leur aptitude à une mise en forme ultérieure. C'est de cette façon que, dans les alliages de titane biphasés, on peut faire disparaître la structure en vannerie qui rend leur mise en forme difficile.

4. Problèmes posés par les traitements thermiques

Les traitements thermiques, chargés d'améliorer les propriétés des alliages, peuvent apporter néanmoins quelques défauts indésirables : on les rencontre au niveau des variations de forme ou de dimensions des pièces traitées, des contraintes résiduelles et de diverses altérations. Pour cette raison, les traitements thermiques offrent certaines difficultés de réalisation, et l'utilisation des pièces traitées demande souvent des précautions.

4.1 Distorsions et contraintes résiduelles dues aux gradients thermiques

Lors du refroidissement ou du chauffage, les vitesses de variations de la température au sein d'une pièce métallique sont limitées par la diffusivité thermique du matériau. Il s'ensuit des hétérogénéités de température dans la pièce, qui provoquent des hétérogénéités de variations dimensionnelles dont il résulte des contraintes. Si les gradients de température sont élevés, ces contraintes peuvent devenir suffisamment importantes pour provoquer des déformations plastiques irréversibles locales, qui conduisent alors à des distorsions de la pièce et à des changements de forme d'ensemble. On rencontre principalement cet effet dans les pièces de section mince ou comportant à la fois des parties minces et des parties massives : les parties minces sont souvent *voilées*. Il en résulte également l'apparition de contraintes résiduelles.

Pour éviter ces inconvénients, il est nécessaire de chauffer ou de refroidir le plus lentement possible pour assurer une meilleure homogénéité de température, sans toutefois rester au-dessous des vitesses critiques nécessitées par les transformations recherchées : chauffage par paliers, trempe dans un fluide à température suffisamment élevée et contrôlée. On utilise aussi parfois, pour la trempe, des *poteyages* sur certaines parties des pièces pour y limiter la vitesse de refroidissement.

La position des pièces lors d'une trempe présente à cet égard un rôle capital : une pièce très longue, trempée à *plat*, est le plus souvent tordue, alors qu'elle reste sensiblement rectiligne si elle est trempée verticalement. En effet, dans ce dernier cas, les gradients de température intéressant des sections plus minces provoquent des

contraintes plus faibles et des déformations moindres. Cela impose souvent de positionner soigneusement les pièces dans des montages convenables, éventuellement de les y brider ou d'utiliser des dispositifs de traitement appropriés : c'est ainsi qu'il existe, pour tremper des pièces en acier très longues, dépassant 30 m, comme des arbres de navires, des fours et des bacs de trempe en forme de puits, atteignant une quarantaine de mètres de profondeur.

4.2 Variations volumiques et contraintes résiduelles dues aux changements de phases

Les traitements thermiques, étant essentiellement fondés sur des changements de phases, conduisent en général à des variations volumiques d'ensemble, résultant des variations de volume massique entre les différentes phases, au cours de ces transformations. Il serait à la rigueur possible d'en tenir compte, lors de la fabrication des pièces à traiter, si ces variations de volume se répartissaient de façon isotrope. Malheureusement, les contraintes qui résultent souvent des hétérogénéités de variation dimensionnelle liées à la non-simultanéité des transformations en chaque point de la pièce (à cause des gradients de température ou de vitesse de refroidissement) conduisent souvent à des variations dimensionnelles plus importantes le long des plus grandes dimensions. Dans les aciers, ces variations volumiques à la trempe sont de l'ordre de 1 %. Elles sont difficilement contrôlables et doivent être réparées par rectification sur des aciers durcis par trempe martensitique.

Ces phénomènes sont aussi souvent la cause de contraintes résiduelles et parfois même de tapures de trempe dans les aciers très chargés en carbone. Leur association avec l'effet des gradients thermiques décrits précédemment (§ 4.1) peut devenir très dangereuse et conduire parfois à la rupture complète d'une pièce traitée. C'est particulièrement ennuyeux quand il s'agit d'une pièce très compliquée, soigneusement usinée, très chère et qui reçoit, en fin de fabrication, un traitement thermique pour lui conférer ses bonnes propriétés définitives.

Les remèdes sont semblables à ceux décrits pour limiter les gradients de température : il faudrait en principe que les transformations se fassent en même temps en tout point de la pièce. Cela nécessite donc des chauffages ou des refroidissements à vitesses modérées. Dans le cas d'une trempe nécessaire pour éviter une transformation dans un certain domaine de température, il sera judicieux de tremper dans un fluide à une température juste inférieure à cette zone de température pour assurer un refroidissement suffisant puis de refroidir ensuite plus lentement (à l'air par exemple) pour assurer une transformation plus régulière, dans la masse de l'alliage : c'est le principe des *trempe étagées* des aciers.

Néanmoins, il faut être très prudent dans l'application des remèdes proposés car, en diminuant la sévérité de trempe par exemple, il peut y avoir non seulement diminution des déformations ou des contraintes résiduelles, mais aussi inversion de ces déformations ou de ces contraintes : ces effets, d'origines thermique, mécanique et structurale, sont très complexes et encore mal maîtrisés malgré les moyens modernes de calcul.

4.3 Altérations superficielles

Au cours du maintien à température élevée, il peut se produire des altérations superficielles sur des pièces chauffées, par réaction avec leur environnement. Il s'agit souvent d'une *oxydation* lors du chauffage à l'air ou dans une atmosphère insuffisamment protectrice (dans le cas du réchauffage de demi-produits, on parle souvent de *perte au feu* quantité de métal perdue sous forme de calamine). Dans les aciers, cette action conduit souvent à une décarburation en surface qui abaisse, après traitement thermique, la dureté superficielle.

Il peut aussi s'agir d'une *surcarburation* lors du chauffage dans une atmosphère carburante, pour les aciers, et même, lors d'un chauffage sous vide trop poussé, de l'*appauvrissement superficiel en certains éléments* comme le chrome dans les aciers inoxydables, ce qui est éminemment préjudiciable à leur bonne tenue ultérieure à la corrosion.

On rencontre aussi des *contaminations superficielles* par des fluides de trempe. Ainsi une pièce trempée à l'eau salée pourra être plus sujette à la corrosion en raison des traces de sel après traitement ; une autre, trempée à l'huile et mal nettoyée, pourra être localement recarburée lors d'un traitement ultérieur : c'est très ennuyeux pour la résistance à la corrosion des aciers inoxydables, par exemple. Ces problèmes imposent souvent un nettoyage soigné des pièces, après traitement, et jouent aussi sur l'aspect des pièces trempées.

4.4 Modifications structurales indésirables

Au cours du traitement thermique d'un alliage, il peut se produire des évolutions structurales indésirables conduisant à une détérioration de ses caractéristiques. Cela impose donc de prendre certaines précautions soit pour le traitement lui-même, soit pour le choix de l'alliage à traiter. On rencontre principalement les cas suivants :

- *grossissement du grain* au cours d'un chauffage prolongé ou à trop haute température, affaiblissant la limite d'élasticité et élevant la température de transition ductile-fragile des aciers ; pour l'éviter, il est prudent d'utiliser un acier à grain stabilisé (acier calmé à l'aluminium) ou un acier au nickel (cet élément limitant le grossissement du grain) ;

- *structure anormale dite de Widmanstätten*, dans les aciers, avec un réseau continu de ferrite, affaiblissant considérablement leur résistance mécanique et provenant souvent d'une surchauffe ;

- affaiblissement de la résistance à la corrosion par *précipitation de carbures ou de composés intermétalliques*, particulièrement aux joints de grains (§ 2.7) ; cela impose alors des trempes plus énergiques ou le choix d'un alliage stabilisé (exemple des aciers inoxydables au niobium ou au titane) ;

- fragilisation indésirable par précipitation ou ségrégation intergranulaire de composés intermétalliques dans certains alliages ou lors d'un revenu : le premier cas est, par exemple, celui de la phase sigma dans les aciers inoxydables ferritiques utilisés à chaud, dont la précipitation est réversible ; le deuxième cas correspond à la *fragilité de revenu* que l'on rencontre dans les aciers entre 400 et 500 °C environ, principalement due à la présence de phosphore ; cette fragilisation, heureusement aussi réversible, interdit néanmoins ce domaine de température pour les revenus, ainsi que des refroidissements trop lents dans cette zone de température ;

- *vieillessement*, à température ambiante ou au cours d'un revenu à température modérée, par formation d'atmosphères d'atomes étrangers (carbone et azote dans les aciers) au voisinage des dislocations, et conduisant à une déformation hétérogène lors d'une mise en forme par déformation plastique (cet effet peut être momentanément supprimé par un faible laminage superficiel : *skin-pass*) ;

- *contraintes résiduelles*, souvent à l'origine de déformations à l'usinage, d'une baisse de résistance à la fatigue et à la corrosion sous tension pour les contraintes superficielles de traction, et pouvant devenir dangereuses en général quand elles se superposent aux contraintes de service ; elles peuvent être atténuées par revenu à température modérée, et, quand cela est impossible sous peine d'affecter les propriétés mécaniques par des évolutions structurales indésirables au cours du revenu, comme pour les alliages d'aluminium, par un étirage de 2 % par exemple ;

- *brûlure* par fusion d'une phase facilement fusible, généralement située aux joints de grains (souvent un eutectique) et conduisant à des détériorations structurales si importantes que l'alliage brûlé est totalement inutilisable.

4.5 Difficultés provenant de la précision de certains traitements thermiques

Il arrive que certains traitements doivent être exécutés à des températures extrêmement précises. Il s'agit principalement des traitements d'homogénéisation avant trempe pour les alliages d'aluminium à durcissement par précipitation, qui doivent être réalisés parfois à ± 3 °C. Cette nécessité impose l'emploi de fours spécialement adaptés et parfaitement régulés, le plus souvent avec une ventilation interne pour assurer l'homogénéité des températures, sans résistances radiantes, pour le traitement des pièces de très grandes dimensions. Des pièces de petite taille peuvent être avantageusement traitées en bains de sels où la température est souvent bien homogène, en raison du brassage du bain par convection.

Pour respecter les cycles thermiques imposés par les traitements, il est souvent nécessaire de manipuler et de déplacer les pièces dans des délais extrêmement précis, ce qui nécessite alors un équipement automatique particulier ou, tout au moins, une discipline de travail très rigoureuse. Par exemple, la nécessité de ne pas dépasser des temps d'attente limites entre trempe et étirage, sur des alliages d'aluminium, doit être bien respectée.

4.6 Difficultés du choix des conditions de traitement thermique

Le choix des paramètres définissant les conditions de traitement thermique est souvent difficile à déterminer *a priori*, car les évolutions structurales au cours de ces traitements dépendent d'un nombre considérable de paramètres. En outre, l'influence des conditions de traitement sur les évolutions de la structure et sur l'apparition de défauts de traitement n'est pas connue théoriquement avec précision, et le contrôle de ces phénomènes est difficile. Cette situation, ajoutée à l'imprécision relative des relations entre les paramètres structuraux et les propriétés des matériaux, ainsi qu'à leurs effets souvent contradictoires sur les diverses propriétés, font que les propriétés obtenues par traitement thermique sont difficiles à prévoir et qu'il est souvent nécessaire de ne faire confiance qu'à des essais préalables. Lors du choix des conditions de traitement, il est donc nécessaire de faire des *compromis* entre les propriétés, les déformations, les défauts de traitement, etc., ce qui ne permet pas toujours d'atteindre les propriétés optimales. Néanmoins, les principes de ces traitements et leur logique sont parfaitement connus, ce qui permet souvent d'estimer les conditions de traitement (température et temps principalement) ou le sens dans lequel il faut les modifier pour améliorer les résultats du traitement.

Nombreux sont les métallurgistes qui ont voulu introduire plus de rigueur dans la détermination des conditions de traitement. C'est ainsi que plusieurs écoles se sont formées pour la prévision par le calcul des propriétés obtenues par traitement thermique, en fonction de la composition de l'alliage traité et du cycle thermique, surtout pour les aciers. Si les résultats du calcul sont satisfaisants pour la majorité des aciers normalisés, ils conduisent parfois à des erreurs grossières sur les propriétés, surtout quand la méthode de calcul, établie pour une nuance donnée, est appliquée à une autre. Cela peut rendre la prévision par le calcul extrêmement dangereuse. Ces anomalies sont la conséquence du nombre considérable de paramètres qui interviennent, en particulier au niveau de la composition de l'acier, et qui ne peuvent tous être pris en compte par le calcul.

4.7 Coûts des traitements thermiques

L'exécution des traitements thermiques dans les conditions choisies a lieu grâce à un ensemble de matériels nécessitant de gros investissements et souvent coûteux en énergie : fours divers, générateurs d'atmosphères, dispositifs de transfert de pièces, etc. En raison de la complexité des opérations et de la particularité de chaque traitement pour des pièces de dimensions, de formes et de matériaux différents, le coût des traitements thermiques est très difficile à déterminer *a priori* : il s'agit le plus souvent de cas d'espèces. Il faut, en réalité, faire un bilan global du coût total de chaque pièce car un traitement thermique sera par exemple bon marché sur un acier cher mais facile à traiter et, au contraire, sera plus cher sur un acier bon marché mais plus difficile à traiter pour obtenir les mêmes caractéristiques finales. Les coûts peuvent devenir très élevés quand il est nécessaire de s'équiper, pour le traitement de pièces particulières, d'une installation spécifique *indispensable* qui ne sera pas utilisée à sa pleine capacité.

4.8 Sécurité

Lors de la réalisation de certains traitements thermiques, il est nécessaire de prendre des précautions pour des raisons de sécurité. Les risques d'accident proviennent principalement des causes suivantes :

- toxicité de certains composés (bains de sels contenant des cyanures, atmosphères toxiques contenant de l'oxyde de carbone par exemple) ;
- utilisation d'atmosphères explosives en cas d'entrée d'air dans les fours (atmosphères contenant de l'hydrogène ou de l'oxyde de carbone) qui imposent souvent une surpression dans les fours et des rideaux de flammes aux portes d'entrée ;
- inflammabilité de certaines huiles de trempe pouvant provoquer des incendies lors de l'immersion de pièces chaudes ;
- instabilité de certains sels pouvant conduire à explosion en cas de surchauffe ou de mélange (lors du passage d'une pièce d'un bain à un autre).

4.9 Limites d'utilisation des pièces traitées

Quand la structure obtenue par traitement thermique n'est pas une structure d'équilibre, ce qui est pratiquement toujours le cas, les pièces traitées dans des conditions précises de température, de temps, d'environnement, etc., ne peuvent évidemment pas être utilisées dans des conditions d'ambiance voisines de celles de leur traitement, car leur structure continuerait alors à évoluer inéluctablement. Comme le traitement a été fait pour conférer aux pièces des propriétés optimales, il en résulterait une dégradation de celles-ci, ce qui rendrait les alliages concernés inaptes à leur emploi.

Des conditions de service nouvelles peuvent provoquer des modifications structurales jusqu'alors inconnues ; c'est ainsi que les effets de l'irradiation des aciers par des neutrons rapides, qui provoquent leur fragilisation ou leur gonflement, ne sont connus que depuis 1967. Ces effets sont liés à la structure et peuvent être en partie contrôlés par traitement thermique.

Ces restrictions d'emploi imposent le plus souvent les précautions suivantes :

- température limite d'emploi des pièces traitées ;
- durée de vie limitée des pièces traitées dans des conditions particulières d'emploi ;

- soudage délicat, voire prohibé, des pièces traitées, ou alors traitement thermique de l'assemblage après soudage (§ 5.4) ;
- limites aux possibilités de mise en forme ou d'usinage de certains alliages subissant des modifications structurales sous l'effet d'une déformation (aciers inoxydables, aciers Hadfield, par exemple).

5. Relations entre les traitements thermiques et les procédés de fabrication

Les traitements thermiques sont souvent liés aux procédés de fabrication, soit que ceux-ci imposent certaines précautions de traitement avant ou après fabrication, soit qu'ils puissent être étroitement associés, voire simultanés.

5.1 Traitements thermiques et moulage

Les pièces moulées demandent souvent des traitements thermiques d'homogénéisation pour améliorer leurs propriétés. Elles peuvent subir aussi toutes sortes de traitement thermique. Mais si elles contiennent des soufflures ou des gaz occlus, elles peuvent gonfler lors des traitements thermiques, ce qui nuit à leurs précisions dimensionnelles. Même un traitement de détente ou de cuisson de peinture à 200 °C peut, pour certains alliages, provoquer des gonflements.

En contrôlant le refroidissement des différentes parties de la pièce dans le moule, on peut obtenir des modifications structurales au cours du refroidissement et par conséquent effectuer un traitement thermique en même temps que le moulage. C'est ainsi que lors du moulage d'un arbre à cames en fonte dans un moule en sable on peut obtenir de la fonte grise pour le corps de l'arbre et de la fonte blanche très dure pour les cames elle-mêmes devant résister à l'usure, en plaçant des refroidisseurs en acier dans le moule, à l'emplacement des cames.

5.2 Traitements thermiques des pièces frittées

Les traitements thermiques des pièces frittées demandent certaines précautions quand leur porosité est ouverte. En effet, lors de leur immersion dans un liquide, elles peuvent s'imprégner de ce liquide qu'il sera difficile d'éliminer par la suite. Mais ce sont surtout les traitements superficiels qui peuvent être très ennuyeux. En effet, le traitement intéresse toute la surface du métal en contact avec le milieu de traitement, y compris la surface des pores internes ouverts sur l'extérieur. S'il s'agit d'un traitement de durcissement superficiel, il peut en résulter une fragilisation d'ensemble de la pièce.

5.3 Traitements thermiques et mise en forme par déformation plastique

Les procédés de mise en forme par déformation plastique demandent aux matériaux une malléabilité et une ductilité suffisantes, surtout pour les procédés à froid. Cela impose souvent une préparation préalable des matériaux par traitement thermique ou des recuits intermédiaires entre les différentes passes.

Pour la frappe à froid, on choisit volontiers un acier à structure *globulisée* beaucoup plus malléable que les aciers ordinaires, car il comporte une matrice ferritique continue contenant des carbures coalescés ne cloisonnant pas la structure.

Pour l'emboutissage, on recherche une bonne ductilité, ce qui explique l'intérêt des alliages cfc, très ductiles, pour les emboutissages profonds. En général, on obtient une bonne emboutissabilité avec un état de surface contrôlé, une taille de grains ni trop faible (alliage trop résistant) ni trop grosse (effet de peau d'orange sur les emboutis) et l'on choisira des textures convenables. Mais d'autres caractéristiques structurales favorables à l'emboutissage ont été découvertes (fort coefficient d'anisotropie plastique, fort coefficient d'érouissage, comme pour les alliages de structure cc) et rendent plus précise la détermination d'une structure favorable. C'est ainsi qu'ont été mis au point les aciers à dispersoïdes et les aciers à structure mixte ferrite-martensite (aciers *dual phase*).

Pour une bonne forgeabilité, on recherche un alliage suffisamment malléable à chaud et ne contenant pas, en particulier, de phases facilement fusibles aux joints de grains. On préfère également utiliser des alliages monophasés, en général plus malléables que les alliages biphasés. Par contre, certains alliages biphasés (par exemple, cuivreux) dont les proportions des phases varient avec la température sont plus malléables à chaud.

Certaines mises en forme à chaud sont favorisées, dans un domaine de température particulier, par l'existence d'une transformation structurale (alliages superplastiques).

Après mise en forme, les principaux traitements thermiques que l'on rencontre sont les recuits de recristallisation ainsi que les traitements de relaxation des contraintes résiduelles. Il en résulte souvent des déformations ou des altérations superficielles qui peuvent imposer le choix d'autres alliages ne nécessitant pas ces traitements thermiques. Après traitement thermique, certains alliages ne peuvent plus être mis en forme par déformation plastique, ou celle-ci peut leur conférer des propriétés dangereuses. C'est, par exemple, le cas des pièces en alliage d'aluminium 2618 A durci par précipitation qui doivent être fraisées pour éviter toute déformation nuisible à leur résistance au fluage.

5.4 Traitements thermiques et soudage

Le soudage en lui-même provoque un véritable traitement thermique dans la zone voisine de la soudure, le plus communément appelée ZAT (*zone affectée thermiquement*). Il s'ensuit couramment soit un adoucissement local trop important, soit une fragilisation dont les conséquences sont aggravées par les risques de formation de défauts dans la soudure et son voisinage (contraintes ou même fissuration d'origine thermique), et éventuellement une sensibilisation à la corrosion, selon les modifications structurales qui en résultent. Ces inconvénients peuvent en grande partie être atténués par des traitements de préchauffage ou de postchauffage qui ont surtout pour but de diminuer les vitesses de refroidissement après soudage, et par le choix d'un alliage dont la structure est stabilisée et a la faculté de ne subir que des modifications structurales limitées ou non dangereuses.

Mais, souvent, il est nécessaire de faire un traitement thermique d'ensemble de la pièce, même pour des constructions énormes, tout au moins pour la relaxation des contraintes résiduelles inévitables après soudage.

5.5 Traitements thermiques et usinage

Il est souvent nécessaire, pour faciliter l'usinage, d'effectuer des traitements thermiques sur certains alliages. Il s'agit en général soit d'un adoucissement, soit d'un recuit ayant pour but la disparition des phases dures et fragiles (redissolution des carbures grossiers dans certains aciers très chargés en carbone ou graphitisation des fontes contenant des carbures). Des traitements de relaxation des contraintes résiduelles permettent de limiter les déformations indésirables à l'usinage, ou les criques superficielles à la rectification.

Parfois il est indispensable, au contraire, d'éviter un traitement thermique pour conserver une structure écrouie, plus résistante, sans qu'elle ne soit trop dure (bronze, laiton de décolletage). La présence de phases fusibles aux joints de grains dans les alliages à usinabilité améliorée est ici particulièrement favorable.

5.6 Place des traitements thermiques dans une gamme de fabrication

La place des traitements thermiques dans une gamme de fabrication joue un rôle capital puisqu'ils peuvent favoriser la fabrication ou en corriger souvent les défauts, mais aussi parce qu'ils peuvent apporter certaines complications. Les problèmes sont surtout liés aux déformations après traitement thermique (imposant souvent des opérations coûteuses de rectification sur des alliages durcis), aux altérations superficielles (nécessitant aussi des reprises d'usinage, ou pouvant rendre difficile le soudage de pièces oxydées : cas des alliages réfractaires au chrome), et aux contraintes résiduelles (pouvant être à l'origine de déformations indésirables lors des opérations ultérieures, ou d'une évolution non homogène de la structure : maturation des alliages d'aluminium par exemple). Il est parfois nécessaire d'effectuer le traitement thermique de durcissement avant mise en forme, soit pour limiter les déformations, ce qui nécessite alors la plupart du temps une mise en forme difficile par usinage, soit pour permettre l'enlèvement par usinage des couches superficielles altérées pendant le traitement (cas des vis pour l'aéronautique par exemple).

Les traitements thermiques classiques sont effectués en discontinu dans une gamme de fabrication, dans la mesure où ils constituent une opération particulière à programmer. La tendance actuelle, surtout pour les demi-produits, consiste à profiter de certaines opérations, effectuées à chaud dans une gamme de fabrication, pour effectuer des traitements thermiques pendant ces opérations ou au cours du refroidissement qui suit.

Quand on peut combiner les procédés de fabrication et les traitements thermiques dans une opération unique, on obtient par ces procédés continus une réduction importante des prix et, le plus souvent, une meilleure régularité de la fabrication. Mais c'est surtout la recherche des économies d'énergie et de la simplification des gammes de fabrication qui a conduit au développement de ces procédés *intégrés*. On rencontre ainsi :

- le laminage continu contrôlé des tôles fortes en acier, qui permet d'obtenir des tôles de ténacité élevée et dont la température de transition ductile-fragile est considérablement abaissée ;
- le laminage continu contrôlé des fils, leur garantissant une régularité de propriétés mécaniques, autrefois inconnue ;

— le recuit continu des tôles laminées à froid, qui simplifie la manutention et augmente les cadences ;

— la trempe directe, en sortie de presse de filage ou de laminage, des alliages d'aluminium, qui, bien que moins efficace que la trempe séparée, simplifie beaucoup les opérations et abaisse les prix.

On rencontre aussi ce principe de traitement thermique en continu sur des pièces proprement dites, au cours de leur fabrication. Il s'agit par exemple :

— de durcissement local par trempe, directement dans un moule de fonderie (§ 5.1) ;

— de la trempe immédiatement après cémentation alors qu'autrefois on pratiquait le plus souvent un traitement coûteux de double trempe ;

— du forgeage isotherme, garantissant une régularité de structure et de propriétés.

5.7 Rôle des traitements thermiques sur le choix des matériaux et des procédés de fabrication

Les traitements thermiques jouent un rôle considérable dans le choix des alliages et des procédés de fabrication. Certains procédés de fabrication peuvent en effet devenir très coûteux quand ils imposent des traitements thermiques pour leur réalisation (cas du matriçage ou de l'extrusion à froid nécessitant des recuits intermédiaires).

Certains éléments d'addition facilitant les traitements thermiques (dans les aciers en particulier) sont très coûteux (nickel, chrome, molybdène principalement), et il est souvent intéressant de s'orienter vers des alliages moins coûteux mais plus difficiles à élaborer (aciers au bore par exemple) ou plus délicats à traiter thermiquement et demandant des précautions de traitement qui en augmentent le prix (aciers au carbone par exemple). Il en résulte qu'il existe un nombre impressionnant de nuances, surtout dans les alliages les plus modernes qui sont souvent brevetés (alliages d'aluminium par exemple), pouvant permettre l'obtention de propriétés semblables, ce qui rend difficile à la fois le choix des meilleures nuances et celui des meilleurs traitements, ce qui grève également les coûts et peut être une source d'erreurs de choix d'alliage ou de traitement.

La préférence pour des traitements thermiques superficiels au lieu de traitements dans la masse est souvent justifiée par des raisons d'économie mais aussi par des meilleures propriétés obtenues pour les pièces traitées superficiellement ; ce choix guide nécessairement vers des nuances particulières d'alliages. Ces traitements sont en développement avec, par exemple, la mise au point de traitements nouveaux comme la cémentation ou la carbonituration des aciers sous très basse pression.

6. Conclusion

Les traitements thermiques, en permettant l'obtention de meilleures propriétés pour les matériaux métalliques, par une bonne adaptation de leur structure, contribuent à l'amélioration du comportement en service des pièces métalliques et à leur facilité de fabrication.

Cette recherche d'une structure optimale, après s'être développée avec les *traitements massifs*, puis, de plus en plus, avec les *traitements superficiels*, évolue de façon plus considérable encore avec les *traitements locaux* des pièces métalliques, lesquelles permettent le plus souvent d'atteindre le meilleur rapport qualité/prix. C'est aussi dans ce but que s'est confirmée l'évolution des traitements thermiques depuis des cycles simples, vers des cycles beaucoup plus complexes (traitements thermo-chimiques et thermomécaniques), et plus particulièrement vers des traitements continus (laminage contrôlé, etc.) qui sont de plus en plus souvent adoptés.

Néanmoins, malgré la démythification des traitements thermiques résultant d'une meilleure connaissance des phénomènes qui y participent, ils restent encore souvent une technique délicate qui ne peut réussir que si elle est fondée sur une exploitation pragmatique des résultats d'expérience et de la pratique industrielle courante. Mais, progressivement, on maîtrise les traitements thermiques de façon plus rigoureuse et plus théorique, grâce au développement des procédés modernes d'investigation, ce qui permet d'optimiser les compromis qu'on est souvent amené à faire dans le choix des conditions de traitement thermique.

Références bibliographiques

- | | | |
|--|--|--|
| [1] FERCHAULT DE RÉAUMUR (R.A.). – <i>L'art de convertir le fer forgé en acier et l'art d'adoucir le fer fondu</i> (1722). | [6] SHEWMON (P. G.). – <i>Transformations in metals</i> . Mac Graw Hill (1969). | [11] TIEN (J. K.) et ANSELL (G.S.). – <i>Alloys and microstructural design</i> . Academic Press (1976). |
| [2] GARNIER (J.). – <i>Le fer</i> . Hachette (1874). | [7] GUILLET (L.) et POUPEAU (P.). – <i>Théorie des transformations à l'état solide</i> . Dunod (1973). | [12] <i>Handbook of Metals</i> . Am. Soc. Metals (1978). |
| [3] BRICK (R.M.), GORDON (R.B.) et PHILIPS (A.). – <i>Structure and properties of alloys</i> . Mac Graw Hill (1965). | [8] WULF (J.). – <i>The structure and properties of materials</i> . J. Wiley and Sons (1973). | [13] KITTEL (C.). – <i>Introduction à la physique de l'état solide</i> . Dunod (1979). |
| [4] Mac CLINTOCK (F. A.) et ARGON (A. S.). – <i>Mechanical behaviour of materials</i> . Addison Wesley (1966). | [9] CHRISTIAN (J. W.). – <i>The theory of transformations in metals and alloys</i> . Pergamon Press (1975). | [14] CHAMPION (P.), GUILLET (L.) et POUPEAU (P.). – <i>Diagrammes de phases des matériaux cristallins</i> . Masson (1981). |
| [5] BÉNARD (J.), MICHEL (A.), PHILIBERT (J.) et TALBOT (J.). – <i>Métallurgie générale</i> . Masson (1969). | [10] ADDA (Y.), DUPOUY (J. M.), PHILIBERT (J.) et QUÉRÉ (Y.). – <i>Éléments de métallurgie physique</i> . CEA (1976 à 1979). | |