



DOSSIER

TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

l'expertise technique et scientifique de référence

m1221

Traitements thermochimiques superficiels - Présentation et classification

Par :

Claude LEROUX

Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), Consultant - Ancien directeur de la Sté Bodycote, Président d'honneur de l'A3TS (Association de traitement thermique et traitement de surface)

Ce dossier fait partie de la base documentaire
Traitements thermiques superficiels et thermochimiques
dans le thème **Traitements des métaux**
et dans l'univers **Matériaux**

Document délivré le 21/05/2012

Pour le compte

7200049069 - arts et metiers paristech // 193.48.193.78

Pour toute question :

Service Relation Clientèle • Éditions Techniques de l'Ingénieur • 249, rue de Crimée
75019 Paris – France

par mail : infos.clients@teching.com ou au téléphone : 00 33 (0)1 53 35 20 20



Techniques
de l'Ingénieur

Traitements thermochimiques superficiels

Présentation et classification

par **Claude LEROUX**

Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM)

Consultant – Ancien directeur de la Sté Bodycote

Président d'honneur de l'A3TS (Association de traitement thermique et traitement de surface)

1. Classification	M 1 221 – 2
2. Modes de renforcement associés aux traitements thermochimiques	– 2
2.1 Durcissement des alliages métalliques en traitements thermochimiques	– 2
2.1.1 Conversion chimique de la région superficielle de l'alliage ..	– 4
2.1.2 Durcissement par trempe à partir de l'état austénitique	– 4
2.1.3 Durcissement par précipitation de composés	– 4
3. Obtention des contraintes résiduelles – Importance	– 5
4. Justification des traitements thermochimiques	– 6
Pour en savoir plus	Doc. M 1 221

Les traitements superficiels concernent une vaste famille de procédés dont l'objectif est d'augmenter les performances mécaniques des pièces traitées.

Les traitements thermochimiques de diffusion ou cémentation, principalement par le carbone et l'azote (carburation appelée couramment « cémentation », « carbonituration », « nitruration », « nitrocarburation »), sont, avec le durcissement par trempe superficielle, les plus utilisés pour le renforcement des pièces mécaniques en alliages fer-carbone (aciers et fontes).

Les traitements thermochimiques concernent cependant toutes les familles de procédés qui conduisent à une transformation chimique par diffusion de la zone superficielle des pièces traitées, la masse est modifiée, mais les dimensions sont inchangées.

Ils se distinguent des procédés :

- CVD (dépôt chimique en phase vapeur) ;
- PVD (dépôt physique en phase vapeur) ;
- PACVD (dépôt chimique en phase vapeur assistée plasma CVD).

Ceux-ci sont du type dépôt par condensation d'un composé défini, sans modification de la nature chimique de la surface du substrat (à l'exception de la zone nanométrique d'adhérence).

1. Classification

Les traitements thermochimiques sont des opérations mettant en œuvre des réactions chimiques en relation avec la température et conduisant à des mécanismes de réaction superficielle avec un milieu réactif, ou donneur, et de diffusion de un (ou plusieurs) élément(s) en profondeur.

En ce qui concerne le carbone et l'azote, les considérations théoriques, principalement sous l'angle des réactions thermodynamiques gaz-métal, ont été abordées dans les articles [M 1 222] et [M 1 224].

Les figures 1 et 2 situent la place des traitements thermochimiques parmi les traitements thermiques et les traitements de surface par voie thermique.

Les traitements thermochimiques de diffusion font partie des traitements superficiels, à côté des traitements de durcissement par trempe après chauffage superficiel.

Les traitements thermiques superficiels se classent également parmi les traitements de surface par voie thermique, à côté des dépôts en phase vapeur et de l'implantation ionique.

Le nom usuel pour désigner le traitement thermochimique est directement lié à celui, ou à ceux, des éléments diffusants. Toutefois, tous les traitements thermochimiques sont, au sens académique, des cémentations (cémentation par le carbone, l'azote, le chrome...).

L'usage a détourné le terme « cémentation » pour « traitement de carburation » ou « cémentation par le carbone ».

Les autres traitements thermochimiques sont alors désignés par un terme traduisant la présence de l'élément diffusant (« nitruration » pour l'azote, « chromisation » pour le chrome...).

Pour chaque traitement il faudra considérer le milieu actif, ou milieu de diffusion, utilisé (tableau 1 et figure 3).

2. Modes de renforcement associés aux traitements thermochimiques

Les objectifs sont d'élever les caractéristiques mécaniques superficielles vis-à-vis de l'usure et de la tenue en fatigue.

- Deux effets sont principalement évalués :
- le **niveau de dureté** ;
 - le **taux de contraintes résiduelles en compression**.

2.1 Durcissement des alliages métalliques en traitements thermochimiques

L'intervention d'un (ou plusieurs) élément(s) réactif(s) lors d'un traitement thermochimique, conduit à des modifications chimiques de la surface résultant de différents mécanismes.

Remarque
Le lecteur se reportera utilement aux articles [M 4 340], [M 4 341].

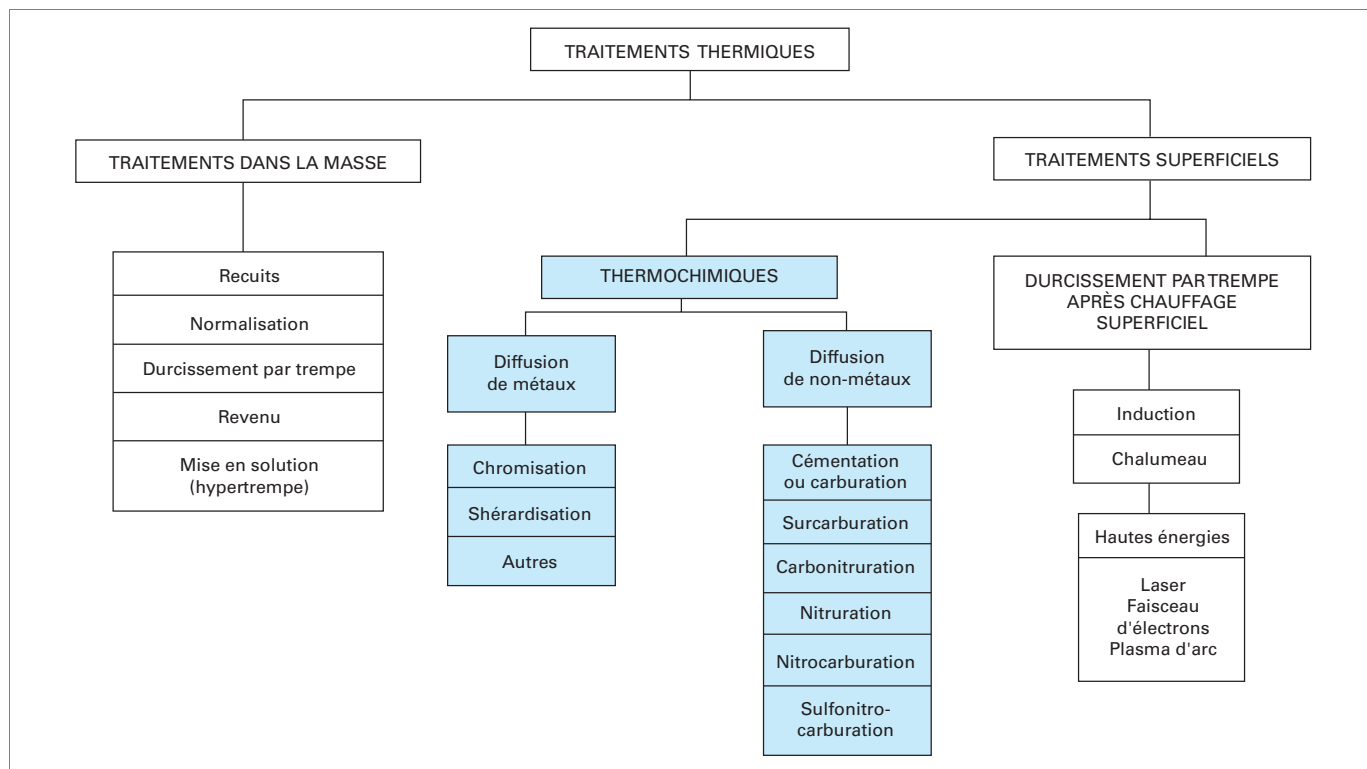


Figure 1 – Classification des traitements thermiques

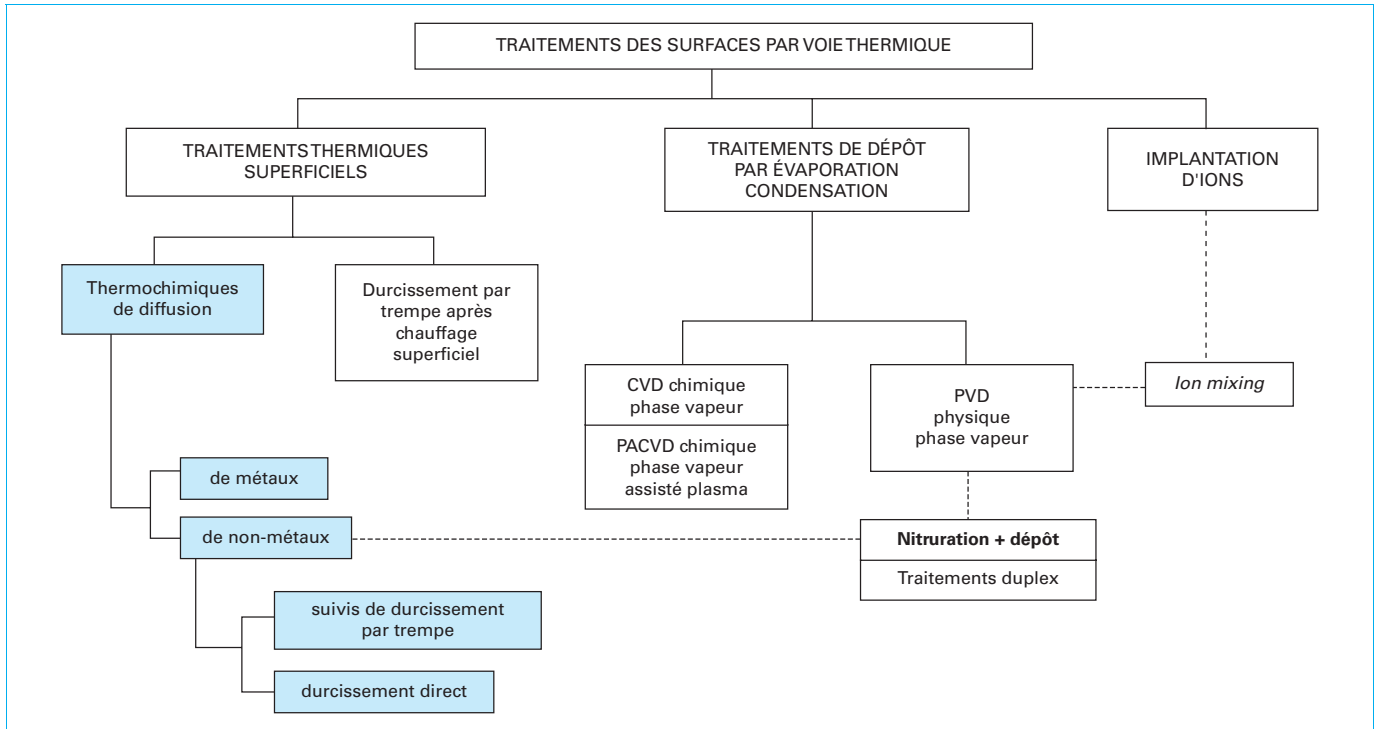


Figure 2 – Traitements des surfaces par voie thermique

Tableau 1 – Éléments diffusants et traitements thermochimiques

Élément(s) diffusant(s)	Traitement	Principaux mécanismes résultants
Carbone	Cémentation (carburation) + durcissement par trempe	Durcissement martensitique par trempe de la zone enrichie en carbone
Azote	Nitruration ferritique	Durcissement par : – précipitation ; – solution solide et combinaison chimique (couche de combinaison).
Carbone + azote	Carbonitruration + durcissement par trempe	Durcissement martensitique par trempe de la zone enrichie en carbone et azote
Azote + carbone	Nitrocarburation ferritique	Durcissement par : – précipitation ; – solution solide et combinaison chimique (couche de combinaison).
Azote + carbone	Nitrocarburation austénitique	Durcissement martensitique (martensite à l'azote) par : – trempe ; – solution solide et combinaison chimique.
Soufre + azote + carbone	Sulfonitrocarburation	Durcissement par : – précipitation ; – solution solide et combinaison chimique.
Azote + carbone + oxygène	Oxynitrocarburation	Durcissement par : – précipitation ; – solution solide et combinaison chimique.
Bore	Boruration	Combinaison chimique (ferro-borure)
Chrome	Chromisation	Alliage et combinaison chimique (carbure de chrome, cas des aciers au carbone)
Aluminium	Aluminisation	Alliage
Chrome + aluminium	Chrome-aluminisation	Alliage
Zinc	Shéardisation	Alliage
Silicium	Siliciuration	Alliage
Manganèse	Manganisation	Alliage

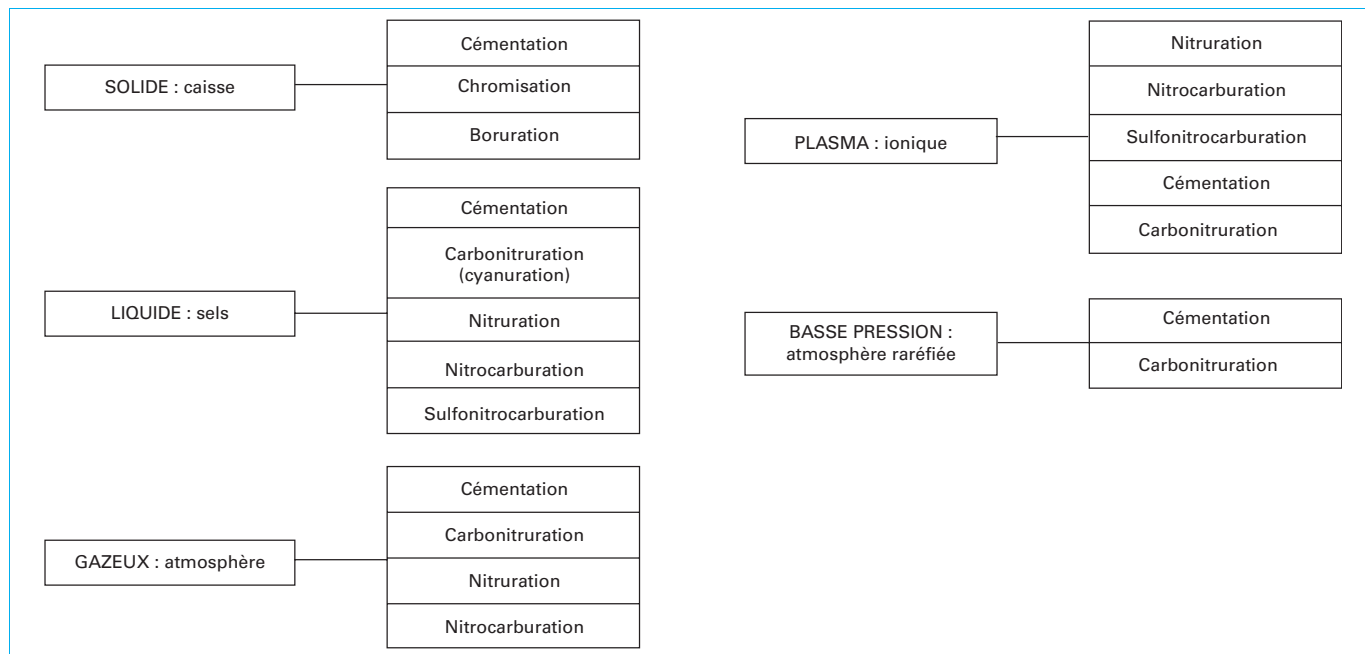


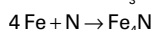
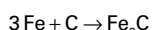
Figure 3 - Milieux de diffusion associés aux traitements thermochimiques

2.1.1 Conversion chimique de la région superficielle de l'alliage

Par croissance d'un composé défini, il en résulte l'apparition d'un nouveau matériau dont les propriétés peuvent être très différentes du substrat. Création d'un carbure, d'un oxyde, d'un nitride.

Ces matériaux sont du type « composés définis » ou « solutions solides secondaires », et ont des caractéristiques de la famille des matériaux appelés « céramiques ».

Leur niveau de dureté est le plus souvent très élevé.



Ces composés s'obtiennent pour des conditions de température et de composition du milieu réactif très précises.

2.1.2 Durcissement par trempe à partir de l'état austénitique

Il se produit après une phase de diffusion elle-même dans l'état austénitique, c'est le cas de la cémentation par le carbone suivie de trempe.

Le durcissement est lié à la formation d'une martensite dont le niveau de dureté est directement en relation avec la teneur en carbone [M 1 226] § 1.1.

Cette transformation, réalisée en général en refroidissant brutalement un acier préalablement austénitisé, se produit par cisaillement du réseau cristallin initial lors de l'apparition du constituant martensitique (qui, pour cette raison, se présente sous forme d'aiguilles ou de lattes) [M 1 115].

La transformation martensitique se produisant, généralement, à des températures relativement basses (à partir du point Ms, de l'ordre de 300 °C, mais dépendant de la teneur en carbone et en éléments d'alliages), les contraintes engendrées par les efforts de cisaillement génèrent une grande quantité de dislocations, donc une résistance à la rupture élevée.

2.1.3 Durcissement par précipitation de composés

Le durcissement par précipitation est défini dans la norme NF A 02-010 de la manière suivante : « durcissement d'un produit ferreux obtenu par précipitation d'un composé dans une solution solide sursaturée ».

L'introduction de zones dures (difficilement franchissables, voire infranchissables, par les dislocations) conduit à un durcissement très important.

Le durcissement, traduisant le blocage des dislocations, peut s'apparenter à l'effet d'une force de frottement venant gêner, voire interdire, leur déplacement.

■ Dans le cas d'un précipité cohérent (même structure que la matrice), l'interaction, et donc l'effet de freinage, sont plus grands que dans le cas d'un précipité incohérent (figure 4).

■ La formation des précipités est régie par une cinétique qui se traduit par l'apparition, dans un premier temps, de zones appelées de « Guinier-Preston », correspondant à un premier agglomérat d'atomes étrangers dans un plan parallèle à une direction donnée de la matrice.

• Pour les obstacles infranchissables, comme par exemple les carbures dans l'acier, le durcissement croît lorsque :

- les obstacles se rapprochent ;
- la fraction volumique augmente ;
- la taille des précipités décroît.

On montre que l'effet de durcissement, $\Delta\sigma$, s'exprime par la relation :

$$\Delta\sigma = \frac{k\sqrt{f}}{r}$$

avec r rayon des précipités,
 f fraction volumique des précipités,
 k constante de l'ordre de 5 000 (si r est exprimé en nm et $\Delta\sigma$ en MPa).

• **Pour les obstacles franchissables**, que la dislocation peut *couper*, autrement dit pour les très petits précipités, le durcissement croît rapidement avec la taille, donc avec l'aptitude à résister à la dislocation.

Par contre, des précipités de taille trop importante seront facilement contournés par une dislocation, et leur effet sera faible ou nul. La figure 5 donne l'effet de durcissement en fonction de la taille des précipités dans un alliage.

On peut remarquer que l'effet de durcissement est maximal quand les précipités sont durs et de très petites tailles (10 nm comme ordre de grandeur). Cet effet est recherché lors de la nitruration en employant des aciers contenant des éléments d'alliages susceptibles de conduire à de très fins précipités (aluminium, vanadium chrome...).

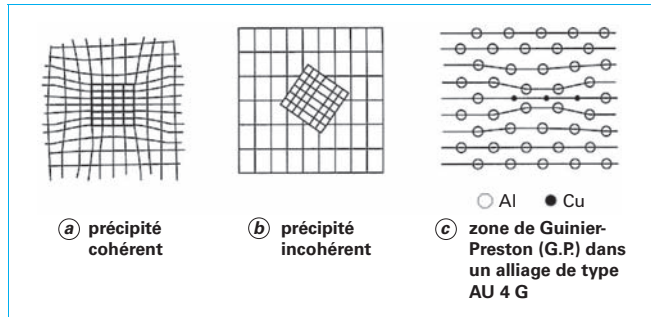


Figure 4 – Typologie de précipités cohérent, incohérent et d'une zone de Guinier-Preston

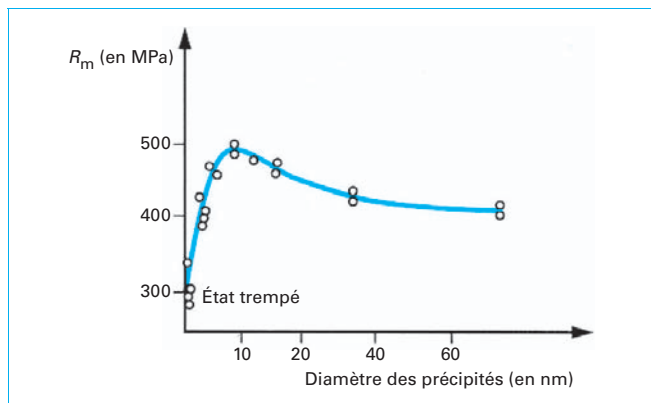


Figure 5 – Effet de la taille des précipités sur le durcissement d'un alliage à base nickel

Carbures	HRC	Knoop	HV
MC (VC, WC)	.....84 à 82 ....	...2 500 à 2 300..	2 800 à 3 000
M ₂ C	.....	.....	2 000
M ₅ C	75,2	1 300	1 500
Cr ₇ C ₃	.....	1 820 à 1 650	(1 400 à 1 500)
M ₂₃ C ₆	.....	.....	1 200
Fe ₃ C	.....	1 150 à 950	850 à 900
M = métal			

Le tableau 2 donne des valeurs de dureté pour quelques carbures présents dans les aciers.

3. Obtention des contraintes résiduelles – Importance

Les traitements mécaniques tels que le grenailage de précontrainte (ou *shot-peening*), le galetage, le roulage (venant parfois en complément des traitements thermiques) sont, à l'évidence, des opérations devant générer des contraintes de compression de la surface.

Les traitements thermiques de durcissement par trempe (sur acier de base préalablement cémenté ou carbonitruré), de nitruration et de durcissement par trempe après chauffage superficiel conduisent, en général, à une mise en contraintes de compression de la surface de l'acier ou de la fonte (figure 6 cas d'une cémentation + trempe directe).

■ Dans le cas des traitements thermochimiques suivis d'un durcissement par trempe (cémentation, carbonitruration), c'est la présence d'un gradient de carbone décroissant de la surface vers le cœur conduisant à la formation de martensite dont le taux de sur-saturation en carbone et, par conséquent, la dureté et le taux de contrainte sont également décroissants, de la surface vers le cœur, si le traitement thermique est bien conduit.

Sur les aciers cémentés, le niveau de dureté le plus élevé et le taux de contrainte de compression maximum sont obtenus pour des teneurs en carbone proches de la composition eutectoïde en l'absence d'austénite résiduelle. Les écarts de carbone entre la surface et le cœur font que les points Ms sont tels que la transformation martensitique du cœur soit majoritairement obtenue avant le départ de la transformation martensitique de la surface.

■ Dans le cas des traitements de durcissement par trempe après chauffage superficiel, seule la couche austénitisée développera, après trempe, des contraintes dont le niveau est en relation avec la teneur en carbone de l'austénite, généralement plus faible que celle rencontrée sur les aciers cémentés.

■ Dans le cas des traitements thermochimiques conduisant à un mode de durcissement par précipitation (nitruration), les contraintes sont développées simultanément sans dépendre du cycle thermique de refroidissement. Elles sont directement en relation avec le type de précipités (taille, composition) et le niveau de dureté obtenu.

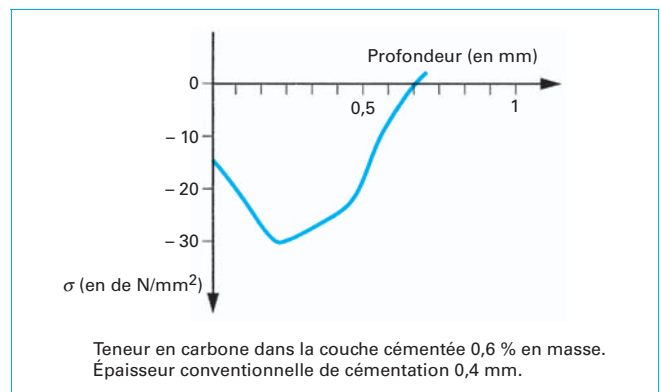


Figure 6 – Profil de contraintes résiduelles sur un acier cémenté/trémpé

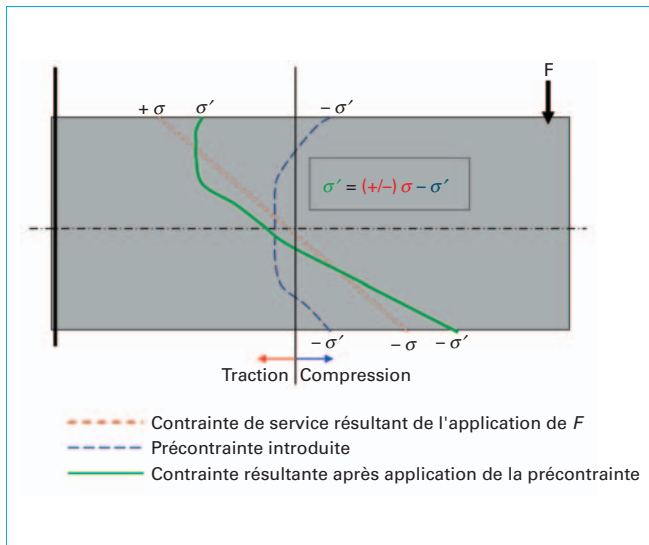


Figure 7 – Mécanisme de superposition des contraintes de service et de précontrainte d'un arbre encastré soumis à un effort de flexion

On peut donc s'attendre à des niveaux de contraintes résiduelles en compression plus élevés avec les niveaux de dureté les plus élevés.

Les nitrurations des aciers les plus riches en éléments d'alliages, formant des nitrures, seront donc les mieux placées, suivies des carbonitrurations cumulant les interstitiels carbone + azote, des cémentations et des durcissements par trempe après chauffage superficiel.

Les contraintes de compression sont favorables à la tenue en fatigue et à la corrosion sous contrainte. Les contraintes de compression viennent en diminution des contraintes de service en traction et renforcent la surface vis-à-vis de la propagation d'éventuelles fissures engendrées par fatigue (en luttant contre leur ouverture sous sollicitations de service).

Pour les mêmes raisons, elles s'opposent à la pénétration et conduisent ainsi à un durcissement superficiel.

Exemple

La figure 7 illustre le mécanisme de renforcement sur un arbre encastré soumis à un effort de flexion à son extrémité. Les contraintes résultantes de F se répartissent en traction + σ et compression - σ en opposition de la fibre neutre.

Après application d'une précontrainte en compression σ', les contraintes finales exercées sur l'arbre sont obtenues par la somme algébrique. Les contraintes de traction sont réduites de la valeur des contraintes de compression, alors que les contraintes de compression se trouvent majorées.

La tenue en service sera ainsi améliorée.

4. Justification des traitements thermochimiques

Les pièces mécaniques ont besoin d'être résistantes aux différentes sollicitations auxquelles elles sont soumises. Ces sollicitations sont, pour l'essentiel, des contraintes d'ordre mécaniques (contraintes

Tableau 3 – Relations sollicitations et propriétés des pièces mécaniques dans le cas de sollicitations massives	
Sollicitations	Caractéristiques demandées
Contraintes statiques (traction, flexion, torsion, cisaillement...)	<ul style="list-style-type: none"> • Module d'élasticité (donné par le choix du matériau) • Caractéristiques mécaniques de résistance statiques : R_e, R_m
Chocs	<ul style="list-style-type: none"> • Ténacité (K_{10}) • Tenue aux essais par chocs (résilience)
Fatigue (contraintes variables en intensité et direction dans le temps)	Caractéristiques mécaniques de fatigue mesurées selon le mode de sollicitation concerné (valeurs associées aux caractéristiques mécaniques statiques et autres propriétés du matériau)
Températures élevées	<ul style="list-style-type: none"> • Comportement au fluage • Résistance à l'adoucissement par élévation de la température (nature du matériau ou propriétés mécaniques obtenues après un traitement thermique conduisant au durcissement suite à un séjour à température élevée.)

mécaniques statiques ou dynamiques) et environnementales (milieu réactif ambiant) conduisant à différents modes de dégradations intervenant, soit massivement, soit superficiellement.

■ Les dommages résultant des sollicitations localisées en surface vont être évités, ou ralentis, par des modifications de propriétés superficielles apportées, notamment, par les traitements superficiels et les revêtements.

■ Les dommages résultant de sollicitations profondes vont demander des caractéristiques mécaniques suffisamment élevées aux profondeurs concernées.

Toutefois, mêmes pour des sollicitations profondes, l'amorçage ou initiation commence près de la surface et les solutions de durcissement superficiel, associées aux renforcements à cœur, sont souvent un choix performant.

Les tableaux 3 et 4 relient les sollicitations et caractéristiques demandées.

Globalement, les traitements superficiels sont destinés à :

- obtenir une dureté superficielle élevée sur une certaine profondeur ;
- concilier résistance superficielle – résistance à cœur – résistance aux chocs par mise en place d'un traitement préalable conférant à l'alliage les caractéristiques recherchées et non affectées par le traitement superficiel final, ou par production de caractéristiques à cœur lors du traitement superficiel lui-même ;
- mettre la surface en compression ;
- modifier la nature physico-chimique de la surface.

Le tableau 5 propose une synthèse des propriétés des traitements superficiels de cémentation – carbonitruration, nitruration – nitrocarburation.

Tableau 4 – Relations sollicitations et propriétés des pièces mécaniques dans le cas de sollicitations superficielles

Sollicitations		Caractéristiques demandées
Usure	Frottement	Dureté, propriétés tribologiques : coefficient de frottement, structure métallurgique.
	Abrasion par un troisième corps	Dureté et structure métallurgique (présence de carbures par exemple)
	Érosion par effet de jet	Dureté superficielle
	Érosion par cavitation	Dureté et propriétés du matériau (comportement en corrosion)
	Adhésion – collage (microgrippages)	Nature des surfaces antagonistes (domaine de solubilité)
	Petits débattements (corrosion de contact, matage)	Nature des surfaces antagonistes (domaine de solubilité)
Grippage	Par frottement (grippage thermique)	Nature des surfaces antagonistes (domaine de solubilité)
	Par petits débattements (grippage par adhésion)	Création de couches superficielles, réduisant le coefficient de frottement, et non miscibles avec l'antagoniste.
Fatigue superficielle- type cisaillement hertzien		Dureté superficielle et durcissement en profondeur dans la zone de localisation des contraintes
Fatigue amorcée en surface par concentration de contraintes		Couche superficielle aux caractéristiques élevées dans la zone de concentration de contraintes et mise en compression de la surface
Corrosion	En milieu humide	Nature du matériau (aciers inoxydables – alliages non ferreux (Al, Ti, Cu). Structure métallurgique Création de couches de protection : – anodique ou sacrificielle ; – cathodique étanche.
	En milieu chimiquement agressif (acides-bases)	Nature du matériau selon le milieu
Température élevée (fatigue thermique superficielle, transfert de matière par collage à chaud)		Création de couches résistantes à l'adoucissement, par élévation de la température, fabriquées lors d'une réaction à température élevée. Création de barrières thermiques Création de couches non miscibles avec l'antagoniste

Tableau 5 – Principales propriétés des traitements thermochimiques de cémentation – carbonituration et nitruration – nitrocarburation

Besoins	Cémentation – carbonituration	Nitruration – nitrocarburation
Dureté superficielle	650 à 850 HV	400 à 1 200 HV Selon l'acier
Profondeur de durcissement réalisable	0,1 à 6 mm	0,05 à 1,5 mm
Résistance à cœur	Selon la nuance et les dimensions	Selon la nuance et le traitement préalable
Modification chimique de la surface	Sans	Création d'une couche de nitrure de fer
Résistance à l'adoucissement par la température	200 °C	< à la T° de nitruration + (500 °C)
Mise en compression de la surface	+ Dépend de la conduite du traitement	++
Maîtrise des déformations	+	++

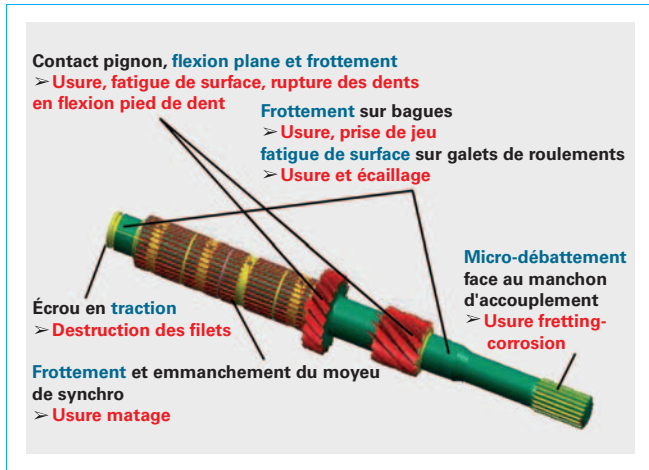


Figure 8 – Exemple de sollicitations relevées sur un arbre primaire de boîte de vitesse automobile

Exemple

La figure 8 et le tableau 6 prennent le cas des sollicitations et/ou des dégradations exercées sur un arbre primaire de boîte de vitesse automobile.

Tableau 6 – Relations sollicitations, ou dégradations, et caractéristiques requises sur un arbre primaire de boîte de vitesse

Modes de dégradations identifiés	Caractéristiques requises
<ul style="list-style-type: none"> • Usure • Fretting corrosion ou corrosion de contact • Fatigue de surface • Grippage • Écaillage hertzien • Prise de jeu • Matage • Rupture 	<ul style="list-style-type: none"> • Dureté superficielle • Épaisseur durcie • Dureté à cœur • Propriétés tribologiques

Traitements thermochimiques superficiels

Présentation et classification

par **Claude LEROUX**

*Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM)
Consultant – Ancien directeur de la Sté Bodycote
Président d'honneur de l'A3TS (Association de traitement thermique et traitement de surface)*

À lire également dans nos bases

LEROUX (C.). – *Cémentation par le carbone et carbonituration – Procédés.* [M 1 225] (2011).

LEROUX (C.). – *Cémentation par le carbone et carbonituration – Mise en œuvre des traitements.* [M 1 226] (2011).

GANTOIS (M.) et DULCY (J.). – *Théories des traitements thermochimiques – Nitruration –*

Nitrocarburation – Systèmes binaires et ternaires fer – azote et fer – azote – carbone – Couche de combinaison. [M 1 224] (2010).

GANTOIS (M.) et DULCY (J.). – *Théorie des traitements thermochimiques – Cémentation – Carburation.* [M 1 222] (2007).

THOMAS (B.) et SCHMITT (J.H.). – *Durcissement des aciers – Mécanismes.* [M 4 340] (2002).

THOMAS (B.) et SCHMITT (J.H.). – *Durcissement des aciers – Rôle de la microstructure.* [M 4 341] (2002).

MURRY (G.). – *Transformations dans les aciers.* [M 1 115] (1998).