



## DOSSIER

### TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

l'expertise technique et scientifique de référence

m1226

## Cémentation par le carbone et carbonitruration - Mise en oeuvre des traitements

Par :

Claude LEROUX

*Ingénieur du Conservatoire national des Arts et Métiers (CNAM), Consultant*

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



# Cémentation par le carbone et carbonituration

## Mise en œuvre des traitements

par **Claude LEROUX**

Ingénieur du Conservatoire national des Arts et Métiers (CNAM)  
Consultant

<b>1. Matériels utilisés</b> .....	M 1 226v2 – 2
1.1 Description d'une ligne de traitement en bains de sels .....	– 2
1.2 Description d'une ligne de traitement en phase gazeuse.....	– 2
1.3 Description d'une ligne de traitement de cémentation sous basse pression .....	– 3
<b>2. Aciers de cémentation et de carbonituration</b> .....	– 4
2.1 Généralités .....	– 4
2.2 Influence des éléments d'alliage sur les teneurs superficielles en carbone et en azote .....	– 5
2.3 Influence de la composition chimique de l'acier sur la résistance à cœur après cémentation ou carbonituration .....	– 5
2.4 Influence de la composition chimique des aciers sur la structure de la couche cémentée ou carbonitrurée .....	– 5
2.5 Influence de la composition chimique de la nuance sur l'épaisseur de traitement .....	– 7
2.6 Influence de la composition chimique des aciers sur la dureté superficielle des couches cémentées ou carbonitrurées .....	– 9
2.7 Cas particulier des aciers inoxydables .....	– 10
<b>3. Caractéristiques de la couche de cémentation ou carbonituration</b> .....	– 10
3.1 Dureté superficielle .....	– 10
3.2 Profondeur conventionnelle durcie .....	– 10
3.3 Profondeur totale enrichie .....	– 10
3.4 Profondeur à un niveau de dureté intermédiaire .....	– 10
3.5 Exigences de microstructure .....	– 11
3.6 Composition en carbone et azote de la surface .....	– 11
3.7 Niveau des contraintes résiduelles .....	– 11
<b>4. Propriétés des pièces cémentées ou carbonitrurées</b> .....	– 11
4.1 Comportement des structures obtenues par cémentation vis-à-vis des sollicitations de service .....	– 13
4.2 Comportement des structures obtenues par carbonituration vis-à-vis des sollicitations de service .....	– 13
<b>5. Normalisation et spécifications</b> .....	– 13
<b>6. Défauts et déformations</b> .....	– 13
6.1 Défauts.....	– 13
6.2 Déformations : variation volumiques et distorsions géométriques .	– 18
6.3 Influence des défauts détectés lors du process .....	– 20
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. M 1 226v2

**L**a description des principes et des procédés a donné les modalités de réalisation d'une cémentation ou carbonituration (se reporter à la 1<sup>re</sup> partie de cet article [M 1 225]). Les moyens mis en œuvre pour la phase de carburation et durcissement diffèrent selon les procédés, les volumes à traiter et les choix industriels. Le choix des nuances d'acier, ainsi que les modalités de contrôle doivent être considérés, ainsi que les anomalies et défauts susceptibles de se présenter.

## 1. Matériels utilisés

### 1.1 Description d'une ligne de traitement en bains de sels

Elle comprend successivement :

- un **poste de préparation des charges** : attachage par fil de fer ou disposition sur des montages ou dans des paniers ;
- une **enceinte de préchauffage** ; dans le cas des fours de cémentation chauffés au gaz, on récupère les gaz de combustion pour les faire circuler dans la cellule de préchauffage ;
- le **bain de cémentation** constitué d'un creuset en acier réfractaire chauffé extérieurement par des résistances électriques ou des brûleurs à gaz. La régulation de température se fait à partir des informations données par deux cannes pyrométriques situées dans le bain et dans la zone de chauffe ;
- le **bain de palier avant trempe** (si justifié) appelé également bain de rinçage destiné à éliminer les sels à forte teneur en cyanure lorsque la trempe est effectuée en bain de nitrates-nitrites ;
- les bains de refroidissement pour trempe :

- **bac(s) à eau destiné(s) à la trempe des aciers non alliés à bas carbone (aciers doux)** ; le milieu de trempe est généralement une solution d'eau additionnée de soude atténuant les phénomènes de caléfaction (sources de points doux) accompagnée d'une agitation énergique et d'un échangeur thermique permettant de maintenir le bain à une température comprise entre 15 et 25 °C ;

- **bac(s) d'arrêt en bain de sels constitué(s) de mélanges de nitrates et nitrites de sodium ou potassium susceptible(s) d'être régulé(s) à une température comprise entre 140 et 400 °C.** Ils permettent d'effectuer une trempe étagée martensitique ou bainitique selon la température de palier. La sévérité de trempe du bain peut être ajustée par apport d'eau et éventuellement contrôlée et régulée à l'aide d'une sonde agissant sur le débit d'eau maintenu dans le bain. À noter que l'utilisation de ces bains permet d'opérer une trempe sur « masse froide » des pièces avec alésage (pignons brochés par exemple). À sa sortie du bain de refroidissement la pièce est placée sur une masse calibrée qui déterminera le diamètre de cette pièce après refroidissement complet ;

- une **cellule de refroidissement avant lavage** ;
- un **lavage à l'eau claire** pour éliminer les sels de la surface des pièces. De façon à rejeter des eaux de lavage sans risque de pollution, on procédera à une neutralisation des cyanures (par des techniques d'oxydation) avant rejet ou on utilisera une technique de lavage en cascade constituée de plusieurs cuves en série permettant une dilution de 10 à chaque étape. L'eau de la cuve la plus concentrée est envoyée en continu dans un évaporateur thermique qui récupère d'une part la phase solide (sels dilués) éventuellement recyclée, et d'autre part l'eau évaporée puis condensée pour réalimenter la cascade de lavage ;
- un **four de revenu à air** ; on peut également utiliser un bain de nitrates-nitrites pour le revenu ;
- un **grenailage éventuel**.

La ligne de traitement peut être aménagée par un système de transport automatique des charges géré par automate.

### 1.2 Description d'une ligne de traitement en phase gazeuse

Elle comprend successivement (unitairement, ou en nombre, selon les besoins) 6 éléments.

#### ■ Poste de préparation des charges

Pour la disposition des pièces dans des paniers ou sur des montages, généralement réalisés en acier réfractaire type 35-15 ou 25-20 obtenus par moulage ou par assemblage par mécanosoudage.

#### ■ Machine à laver ou machine à dégraisser

Le plus fréquemment, on utilisera une machine à laver à la lessive alcaline ou acide avant cémentation. Si les pièces ne sont pas trop grasses on peut avoir avantage à utiliser des lessives légèrement acides dépassivantes. Ces machines sont normalement équipées pour travailler par phases d'immersion-aspersion au lavage et au rinçage, avec séchage à l'air chaud. Le poste de lavage peut être commun au lavage avant et après traitement avec trempe huile. Idéalement il est préférable de séparer ces deux opérations qui sont destinées à éliminer des produits différents. Dans le cas d'un lavage avant traitement en milieu acide il faudra avoir obligatoirement une machine à laver différente après traitement.

#### ■ Four de préchauffe entre 450 et 600 °C

Sous atmosphère de protection ou éventuellement sous azote. La préchauffe intervient sur les installations de four à charge. Elle est facultative, mais présente l'avantage d'améliorer le rendement par réduction du temps de montée en température dans le four de cémentation et est favorable à la réduction des déformations liées au cycle thermique au chauffage et favorise l'activation de la surface (cf. § 6.3).

#### ■ Four de cémentation

Ce four peut être :

##### • Un four à charge :

- four puits, à pot ou à cloche avec transfert vers un bac de trempe à l'huile ou une cellule de trempe au gaz surpressé avec protection gazeuse éventuelle durant le transfert de la charge du four vers le milieu de trempe. Ces fours sont parfois utilisés pour réaliser des cémentations sans trempe. Dans ce cas, la charge se refroidit dans le moufle ou dans une cellule éventuellement ventilée pour accélérer le refroidissement ;

- four à bac de trempe incorporé (le terme anglo-saxon *batch-type* est souvent utilisé par les praticiens). Ces fours sont dotés d'une chambre étanche destinée à fonctionner en légère surpression avec le gaz de cémentation ou de carbonituration, prolongée par un vestibule entrée-sortie, ou sortie seule dans le cas d'un four traversant, contenant le bac de trempe à l'huile. Ils ont l'avantage de pouvoir être chargés à la température de traitement et de protéger la charge avec le gaz de traitement durant son transfert en trempe (figure 1).

• **Un four continu multi-zones de type poussant** (à une ou plusieurs files) (figure 2), à sole tournante ou à tapis transporteur. Ils sont bien adaptés aux grandes séries ou au moins aux réglages de spécifications identiques. Leurs capacités vont de 200 à 1 000 kg/h selon les profondeurs à obtenir et leur longueur. Le bac de trempe est incorporé à l'installation. Ces fours permettent de privilégier des petites charges par plateau (dont le nombre présent dans le four détermine la capacité pondérale horaire) qui donneront des résultats plus homogènes dans la charge surtout en termes de déformations.

• **Sur les pièces dont la géométrie est difficile à maîtriser** : « parapluie » sur engrenages, alésages de pignons (cotes sur cannelures), la trempe peut être réalisée sous presse, soit directement à la sortie du four (à l'aide de manipulateurs), soit après reprise de réchauffage après cémentation sans trempe, en four séparé (le plus souvent à sole tournante) (figure 3).

**Quel que soit le type de four**, les chambres de traitement, ou laboratoires, sont équipées de turbines de brassage de l'atmosphère, de moufle interne pour favoriser la circulation des gaz, de dispositifs d'injection des gaz et de prélèvement de ceux-ci pour analyse.

Les sas contenant les bacs de trempe (cas des fours à bac de trempe incorporé) sont refroidis, les bacs eux-mêmes sont convenablement régulés en température et agités par des brasseurs et turbines.

#### ■ Installation de lavage ou dégraissage après trempe

À l'huile équipée d'un système de déshuilage destiné à épurer le bain de lavage et récupérer les huiles pour recyclage éventuel ou élimination contrôlée.

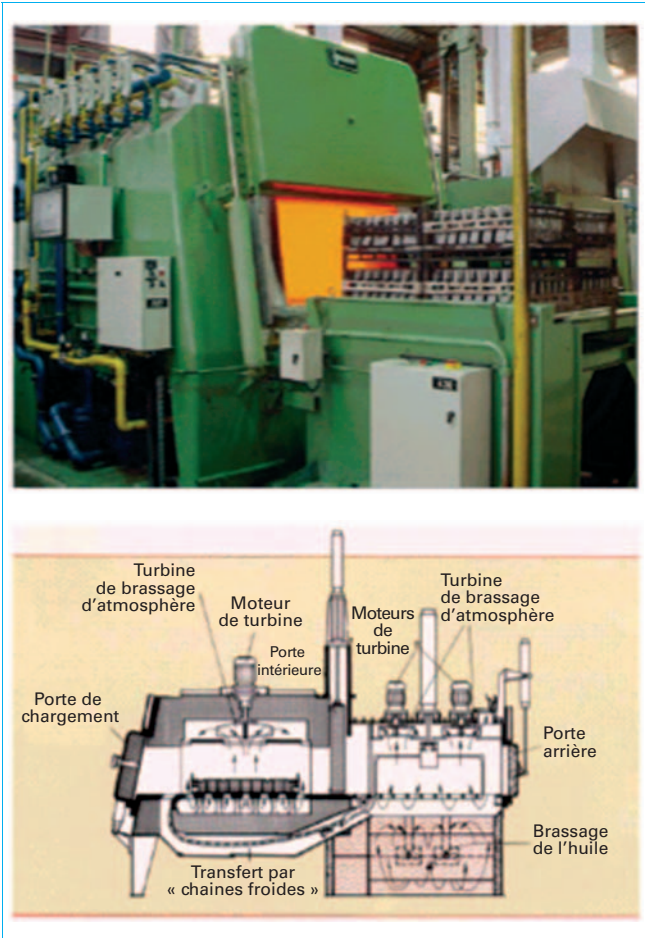


Figure 1 – Schéma et vue d'un four à bac de trempe incorporé traversant (Crédit IPSEN)

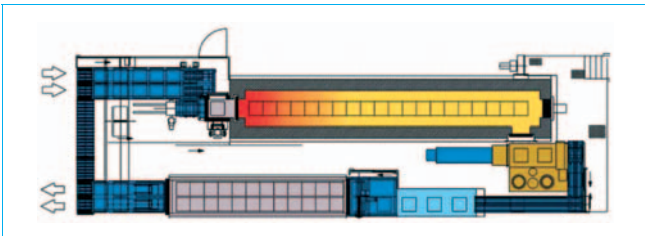


Figure 2 – Schémas d'un four poussant simple file pour cémentation trempe de pièces de boîte de vitesse (Crédit Aichelin)

- Four de revenu  
Si nécessaire.

### 1.3 Description d'une ligne de traitement de cémentation sous basse pression

#### ■ L'installation comprend :

– un poste de préparation des charges, comparable à ceux de la cémentation gazeuse, toutefois les alliages réfractaires constituant les paniers et montages doivent être modifiés pour éviter leur carburation rapide que la basse pression amplifie ;

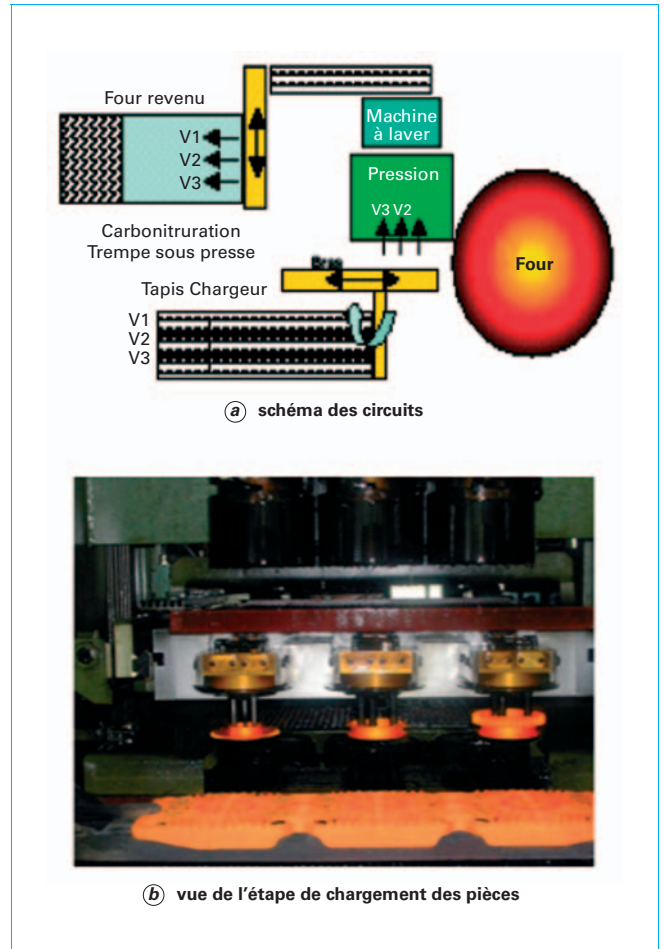


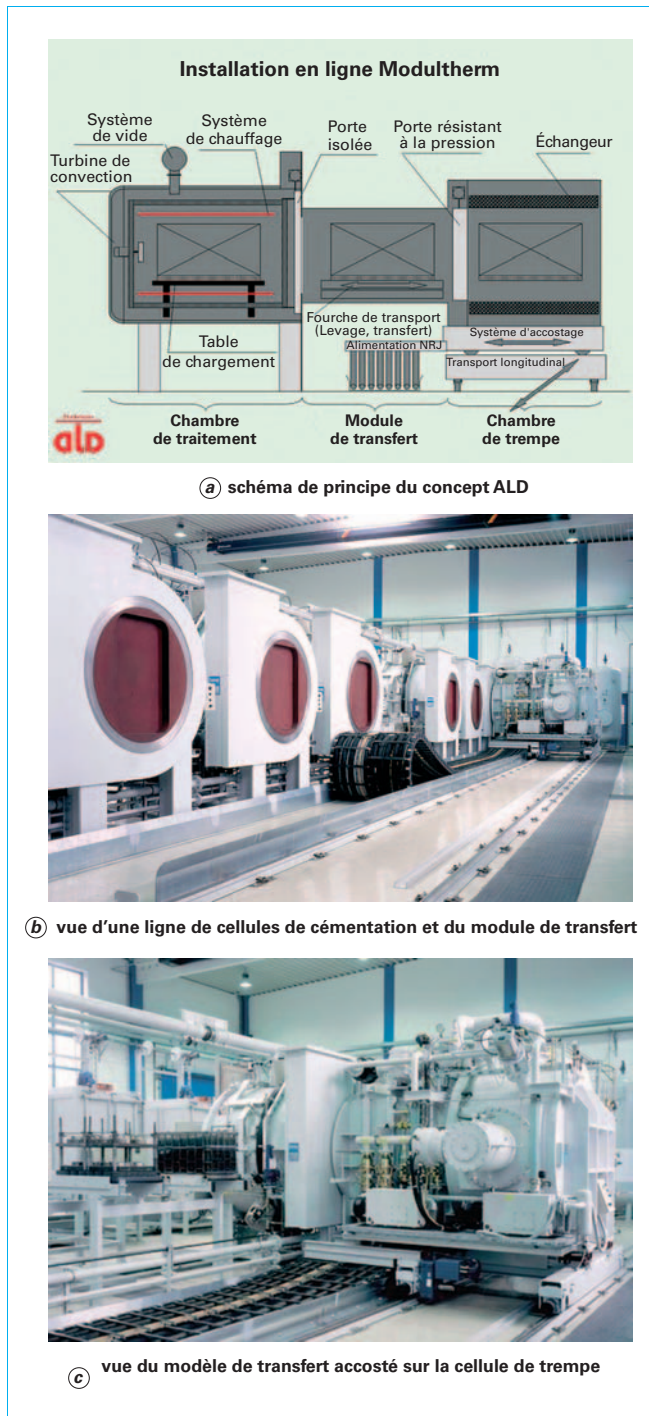
Figure 3 – Schéma d'un four à sole tournante avec trempe sous presse et vue de la prise des pièces pour transfert sur la presse (Crédit Renault/Aichelin)

- un moyen de nettoyage avant cémentation dont l'efficacité doit être renforcée par rapport à la cémentation gazeuse pour ne pas affecter les réactions de transfert ;
- une enceinte de carburation dotée d'un système de mise sous vide et d'injection des gaz de cémentation. Il est possible de limiter l'installation à cette seule enceinte qui sert à la fois de chambre de carburation et de refroidissement.

Le plus souvent, l'installation comprend un sas d'enfournement et de transfert, éventuellement sous vide primaire et une chambre (ou plusieurs) de refroidissement pour trempe (refroidissement sous gaz sous pression ou dans l'huile).

#### ■ Deux concepts sont représentés dans les figures 4 et 5.

- Dans la figure 4, le concept du constructeur ALD, avec des chambres de traitement séparées connectées à un sas de transfert mobile doté d'un système d'accostage avec maintien sous vide se dirigeant vers une chambre de trempe sous gaz.
- Le constructeur IPSEN offre sensiblement le même principe sans sas mobile de transfert, la cellule de trempe se déplaçant vers chaque cellule de carburation.
- On trouve aussi figure 5, le concept du constructeur ECM avec une ou plusieurs chambres de carburation et chambre de trempe



**Figure 4 – Exemple d'une installation modulaire de cémentation basse pression (système ModulTherm ALD, constructeur IPSEN)**

sous gaz et/ou à l'huile, raccordées à un vestibule sous vide primaire distribuant les charges.

Il existe également des installations mono-chambre conçues comme un four à bac incorporé de cémentation gazeuse, bien adaptées à la trempe huile.



**Figure 5 – Installations de cémentation sous basse pression (constructeur ECM)**

## 2. Aciers de cémentation et de carbonituration

### 2.1 Généralités

Le choix de l'acier sur lequel le traitement est réalisé est un paramètre important vis-à-vis des possibilités d'obtention de la structure et, donc, des propriétés de la pièce cémentée ou carbonitrurée.

Sur le principe, on considère qu'un acier de cémentation, ou de carbonituration, doit avoir un bas carbone, c'est-à-dire une teneur en cet élément inférieure à 0,4 %. Cette basse valeur permet, après traitement, de conserver de bonnes caractéristiques de ténacité, tout en bénéficiant de bonnes propriétés de surface grâce à l'apport des interstitiels au cours du traitement.

À l'intérieur de la fourchette de carbone indiquée plus haut, on réserve généralement la zone 0,2 à 0,4 % C aux nuances destinées à la carbonituration, alors que les teneurs inférieures à 0,2 % sont plus particulièrement attribuées à la cémentation. En fait, ces tendances doivent être observées en se souvenant que l'on recherche, le plus souvent, des épaisseurs de traitement plus faibles en carbonituration qu'en cémentation et, de ce fait, que l'on a besoin d'un cœur plus résistant, donc plus riche en carbone.

Bien entendu, rien n'empêche de cémenter des aciers à très forte teneur en carbone si le besoin s'en fait sentir pour améliorer certaines propriétés (cf. § 4).

Les éléments d'alliage présents dans les nuances traitées ont également une forte influence sur les propriétés des pièces, car ils interviennent sur :

- la teneur en carbone que l'on peut obtenir à partir d'un potentiel carbone donné, dans le cas des cémentations et carbonitrurations ;
- les propriétés de résistance et de ténacité du cœur, par l'intermédiaire de la trempabilité ;
- les caractéristiques de la couche du traitement thermo-chimique : épaisseur, microstructure.

Avant de présenter les différentes classes d'aciers utilisées en cémentation et carbonitruration, nous allons examiner les diverses influences qui viennent d'être évoquées.

## 2.2 Influence des éléments d'alliage sur les teneurs superficielles en carbone et en azote

Cet aspect découle de la notion d'activité développée dans l'article [M 1 222] et l'influence du facteur d'alliage proposé par Neuman et Person [14] ou Gunnarson [15].

L'utilisation pratique de telles formules pour la prévision sur des alliages industriels doit faire l'objet de vérifications ; elles semblent s'appliquer essentiellement aux aciers faiblement alliés.

Par ailleurs, elles permettent de raisonner qualitativement quant au pouvoir sur ou sous-cémentant, ou nitrurant, des divers éléments.

La figure 6 (d'après [16]) montre, pour quelques nuances classiques de cémentation, la relation entre potentiel carbone et teneur en carbone.

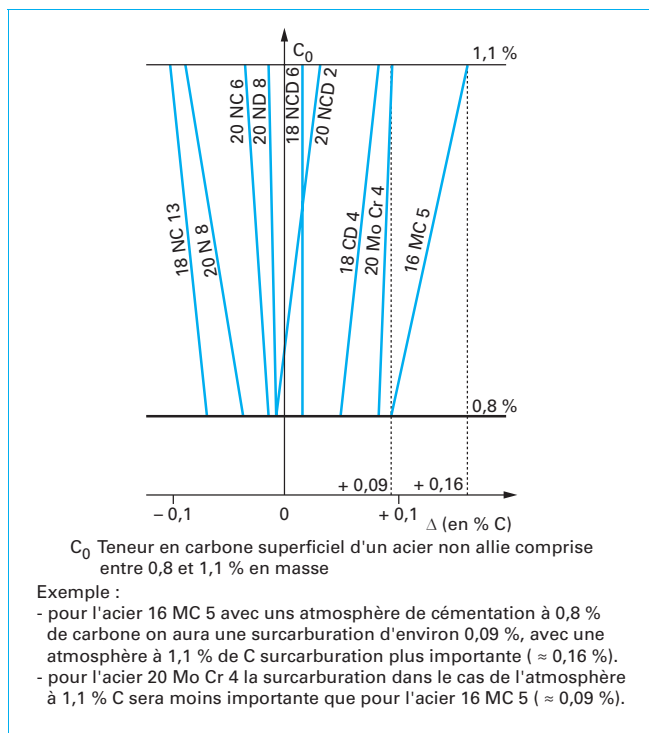


Figure 6 – Influence des nuances d'acier sur la teneur en carbone

## 2.3 Influence de la composition chimique de l'acier sur la résistance à cœur après cémentation ou carbonitruration

Les caractéristiques à cœur et en particulier le niveau de résistance et la dureté après traitement de trempé dépendent de la teneur en carbone et de la trempabilité de la nuance. Le choix des caractéristiques à cœur de la pièce est donc le problème classique du choix d'une nuance en fonction des dimensions et de la masse de la pièce. Dans ce domaine, plusieurs logiciels d'aide au choix ont été développés ([17] [18]).

Les figures 7 et 8 donnent une première approche de ce choix pour quelques nuances couramment utilisées en pratique (article [M 315]).

Les aciers les plus couramment utilisés sont les nuances : 16MnCr5, 16NiCr6, 16NiCr13, 18CrMo4, 20NiCrMo2, 20MnCr5, 27MnCr5.

## 2.4 Influence de la composition chimique des aciers sur la structure de la couche cémentée ou carbonitrurée

### 2.4.1 Contrôle des carbures et carbonitrides

Les conditions de traitement habituellement réalisées en carbonitruration favorisent rarement l'apparition de carbonitrides (épaisseurs faibles). Pour cette raison, nous nous limiterons dans ce

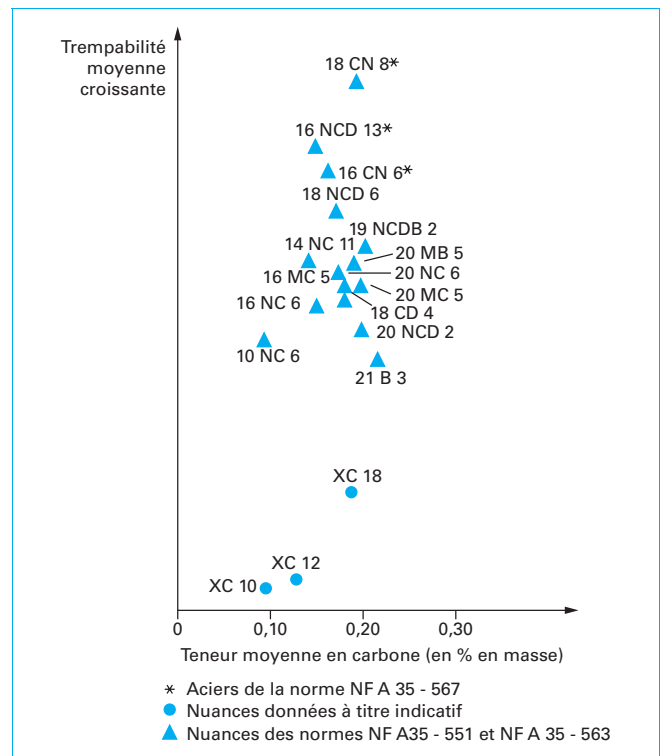


Figure 7 – Diagramme niveau de résistance – trempabilité pour quelques nuances de cémentation

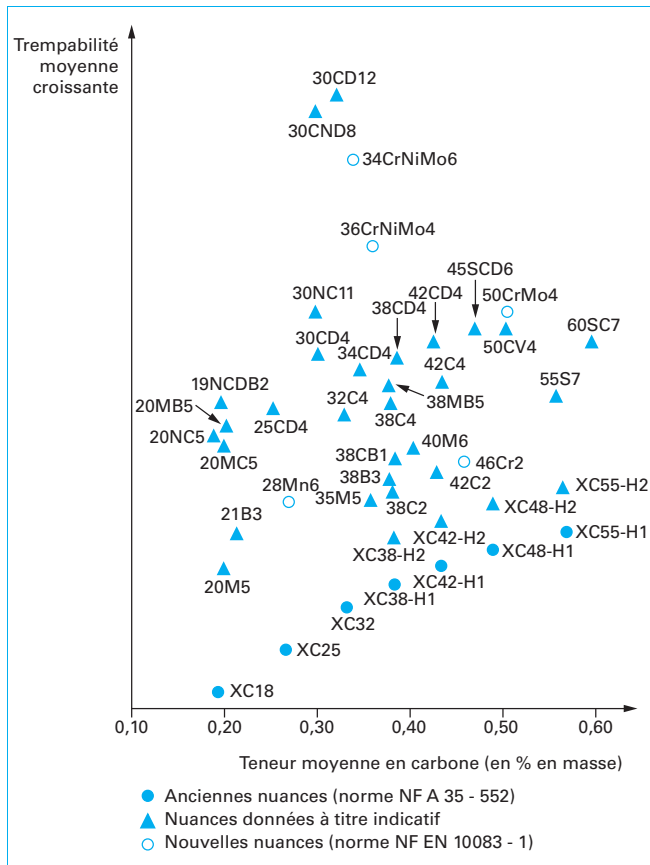


Figure 8 - Diagramme niveau de résistance - trempabilité pour quelques nuances de carbonituration

paragraphe au cas de la cémentation. Pour ce dernier traitement, des carbures peuvent apparaître dans la couche enrichie en carbone dès que la teneur en cet élément franchit la ligne  $A_{cm}$  du diagramme d'équilibre.

■ Les paramètres importants pour contrôler l'apparition des carbures sont donc :

- la teneur en carbone introduite lors de la cémentation ;
- la température de maintien avant la trempe et les éléments d'alliage de l'acier qui agissent sur la position de  $A_{cm}$  (figure 9).

On trouve dans la littérature les données pratiques qui indiquent, pour les diverses familles d'acier de cémentation, les points  $A_{cm}$  en fonction des teneurs en carbone des couches.

■ La formule ci-après déduite de Gunnarson (cf. [M 1 222]) permet également d'évaluer le risque d'apparition des carbures :

$$A_{cm} = 4\,798,6 / \ln \left[ \frac{(100 - 19,6C)}{(100 + u)C} \right]$$

avec  $A_{cm}(^{\circ}C)$  température à laquelle la cémentite d'un acier hypereutectoïde achève de se dissoudre,

$C$  teneur en carbone (en % en masse),

$u$  coefficient dépendant des éléments d'alliage. (cf. [M 1 222]).

■ D'autres facteurs, tels la vitesse de refroidissement entre la température de cémentation et la température de trempe, les temps de maintien, etc., peuvent également avoir une influence sur la présence de carbures.

Toutefois, on notera que le risque d'apparition des carbures, apprécié à partir des conditions d'équilibre, est pessimiste par rapport à la réalité et, en conséquence, les données indiquées plus haut sont valables pour la pratique courante du traitement thermique.

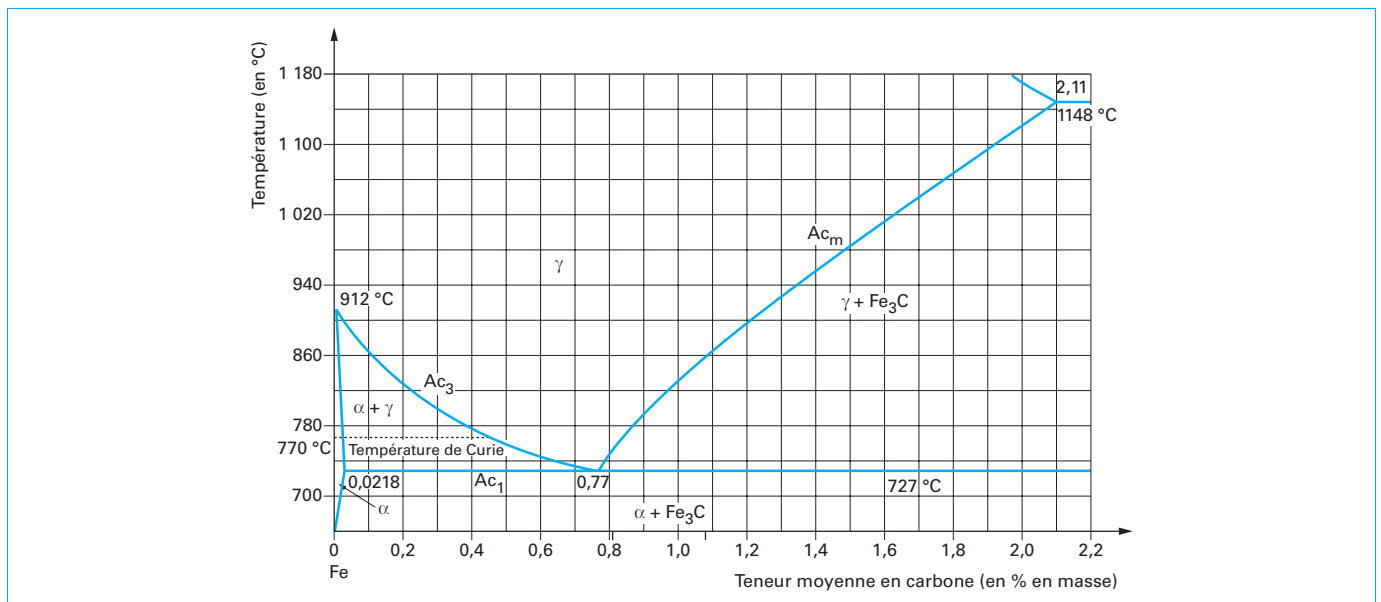


Figure 9 - Diagramme d'équilibre fer-carbone

## 2.4.2 Maîtrise de l'austénite résiduelle

Parmi les paramètres influant sur l'austénite résiduelle dans un cycle de cémentation et trempe directe figurent : la température d'arrêt de la trempe, la vitesse de refroidissement et les divers facteurs qui peuvent agir sur la composition de l'austénite avant trempe. La nuance d'acier, par l'intermédiaire de ses éléments d'alliage, agit sur la présence d'austénite résiduelle.

La formule de Koistinen et Marburger, déjà citée, montre que la présence de ce constituant peut être reliée au point  $M_s$  de la nuance. Or cette température est souvent appréciée grâce à des formules qui mettent en évidence l'influence des divers éléments d'alliage. Parmi les plus employées, on peut citer celles développées par Andrews [19] :

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

ou Steven et Haynes [20] :

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

Ces formules, valables jusqu'à des teneurs en carbone de 0,60 %, doivent être corrigées au-delà, comme proposé par Steven et Haynes [20]. Elles permettent de constater que l'action des éléments d'alliage reste faible devant l'influence du carbone, introduit pendant la cémentation, dont la teneur dans la couche superficielle est le principal facteur de maîtrise de l'austénite sur un plan pratique.

L'effet de l'azote en carbonituration est semblable à celui du carbone, ainsi que le montre la formule proposée par Lesage pour évaluer  $M_s$  dans le cas d'un enrichissement en carbone et en azote [21]. Le terme qui doit être ajouté à la formule de Haynes est - 330 N %.

## 2.4.3 Contrôle de l'oxydation interne

Ce phénomène est lié à la présence de certains éléments d'alliage : manganèse, silicium, chrome, présents dans l'acier et qui ont tendance à s'oxyder dans les milieux contenant de l'oxygène (cf. [M 1 222] § 2.5 et tableau 1).

Des nuances d'acier à faibles teneurs en ces éléments ont été élaborées en vue de la cémentation sans toutefois apporter une solution définitive à ce problème en cémentation gazeuse ([22] [23]).

## 2.4.4 Contrôle de la formation de bainite en surface en carbonituration

Le chrome, le manganèse et le molybdène sont, dans l'ordre décroissant, les éléments les plus défavorables pour ce type de défaut (tableau 1).

La norme NF EN 10084, publiée en juin 2008, traite des conditions techniques de livraison des aciers pour cémentation (tableau 2).

## 2.4.5 Contrôle de la présence de porosités superficielles en carbonituration

Actuellement, le mécanisme de formation des porosités n'est pas clairement établi. Le rôle des éléments d'alliage semble cependant important, puisqu'on n'observe ce phénomène avec les aciers moyennement alliés que pour des teneurs importantes en azote dans la couche traitée (1 % N pour un acier 25 CrMo 4 traité à 880 °C).

En revanche, pour des aciers au carbone ou de décolletage, le seuil d'apparition est notablement abaissé (0,4-0,5 % N et 0,75 % C pour des aciers C et 12 MnS 4).

Il semble, par ailleurs, que les inclusions de sulfures favorisent la présence de porosités. Les conditions tout particulièrement en cause sont l'excès d'ammoniac et les retouches.

**Tableau 1 – Sensibilité à l'oxydation interne des principales nuances pouvant être cémentées ou carbonitrurées**

Nuances	C superficiel pour un potentiel carbone de 0,8 % (% en masse)	Sensibilité à l'oxydation interne
XC 10	0,80	+
XC 12	0,80	+
XC 18	0,80	+
16 MC 5	0,89	+++
20 MC 5	0,89	+++
18 CD 4	0,89	++
10 NC 6	0,85	++
16 NC 6	0,85	++
20 NC 6	0,85	++
14 NC 11	0,78	+
20 NCD 2	0,83	++
18 NCD 6	0,85	+
21 B 3	-	+
20 MB 5	-	+
19NCDB2	-	+

(1) Valeurs calculées à partir des compositions moyennes données par la norme NF A 35-551 et d'après F. Neuman et B. Person (Hart. Tech. Mitt. 23, 1968, Heft 4).

(2) Notation : + peu sensible ; ++ sensible ; +++ très sensible  
Potentiel carbone : teneur en carbone à la surface d'un échantillon de fer pur en équilibre avec le milieu de cémentation dans les conditions retenues.

## 2.5 Influence de la composition chimique de la nuance sur l'épaisseur de traitement

L'épaisseur cémentée est, d'après sa définition normalisée (NF A 04-202), appréciée à l'aide d'une mesure de dureté. La nuance utilisée exerce une influence sur ce paramètre par l'intermédiaire de sa trempabilité.

■ Pour les pièces de petites dimensions, cette influence est faible. Le profil carbone et les conditions de refroidissement sont les éléments prépondérants qui agissent sur l'épaisseur traitée.

■ En revanche, pour de grosses pièces, la prise en compte de ce paramètre prend toute son importance (figure 10 [24]).

■ Pour choisir un acier en prenant en compte cet effet, plusieurs méthodes ont été proposées.

• Wyss [24], par exemple, détermine la teneur en carbone nécessaire pour conférer la dureté qui sert de référence pour l'évaluation de l'épaisseur (550 HV1 le plus souvent) à partir de courbes

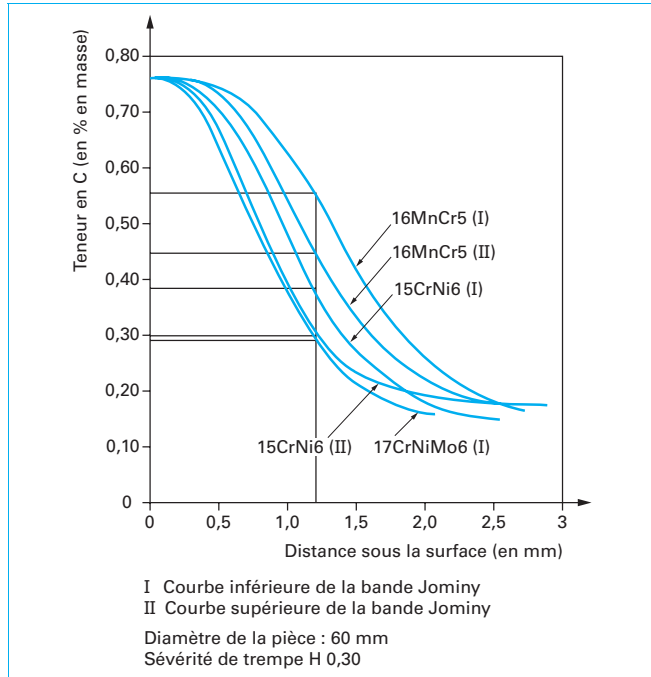


Tableau 2 – Nuances de la norme NF EN 10084 aciers de cémentation

Désignation de l'acier		Composition chimique en %								
Symbolique	Numérique	C	Si max.	Mn	P max.	S	Cr	Mo	Ni	B
C10E	1 1121	0,07 à 0,13	0,40	0,30 à 0,60	0,035	0,035	Aciers au carbone			
C10R	1 1207	0,07 à 0,13	0,40	0,30 à 0,60	0,035	0,020 à 0,040				
C15E	1 1141	0,12 à 0,18	0,40	0,30 à 0,60	0,035	≤ 0,035				
C15R	1 1140					0,020 à 0,040				
C16E	1 1148	0,12 à 0,18	0,40	0,60 à 0,90	0,035	≤ 0,035				
C16R	1 1208	0,12 à 0,18	0,40	0,60 à 0,90	0,035	0,020 à 0,040				
17Cr3	1.7016	0,14 à 0,20	0,40	0,60 à 0,90	0,035	≤ 0,035	0,70 à 1,00			Acier au Cr
17CrS3	1 7014					0,020 à 0,040				
28Cr4	1 7030	0,24 à 0,31	0,40	0,60 à 0,90	0,035	≤ 0,035	0,90 à 1,20			
28CrS4	1.7036					0,020 à 0,040				
16MnCrS5	1.7131	0,14 à 0,19	0,40	1,00 à 1,30	0,035	≤ 0,035	0,80 à 1,10			Aciers MnCr/MnCrB
16MnCrS5	1.7139					0,020 à 0,040				
16MnCrB5	1.7160	0,14 à 0,19	0,40	1,00 à 1,30	0,035	≤ 0,035	0,80 à 1,10			0,0008 à 0,0050
20MnCr5	1 7147	0,17 à 0,22	0,40	1,10 à 1,40	≤ 0,035	≤ 0,035	1,00 à 1,30			
20MnCrS5	1.7149					0,020 à 0,040				
18CrMo4	1.7243	0,15 à 0,21	0,40	0,60 à 0,90	0,035	≤ 0,035	0,90 à 1,20	0,15 à 0,25		Aciers CrMo
18CrMoS4	1.7244					0,020 à 0,040				
22CrMoS3-5	1.7333	0,19 à 0,24	0,40	0,60 à 1,00	0,035	0,020 à 0,040	0,70 à 1,00	0,40 à 0,50		
20MoCr3	1 7320	0,17 à 0,23	0,40	0,70 à 1,00	0,035	≤ 0,035	0,40 à 0,70	0,30 à 0,40		Aciers MoCr
20MoCrS3	1.7319					0,020 à 0,040				
20MoCr4	1.7321	0,17 à 0,23	0,40	0,70 à 1,00	0,035	≤ 0,035	0,30 à 0,60	0,40 à 0,50		
20MoCrS4	1 7323					0,020 à 0,040				
16NiCr4	1 5714	0,13 à 0,19	0,40	0,70 à 1,00	0,035	≤ 0,035	0,60 à 1,00		0,80 à 1,10	Aciers NiCr/CrNi
16NiCrS4	1 5715					0,020 à 0,040				
10NiCr5-4	1 5805	0,07 à 0,12	0,40	0,60 à 0,90	0,035	≤ 0,035	0,90 à 1,20		1,20 à 1,50	
18NiCr5-4	1 5810	0,16 à 0,21	0,40	0,60 à 0,90	0,035	≤ 0,035	0,90 à 1,20		1,20 à 1,50	
17CrNi6-6	1 5918	0,14 à 0,20	0,40	0,50 à 0,90	0,035	≤ 0,035	1,40 à 1,70		1,40 à 1,70	
15NiCr13	1 5752	0,14 à 0,20	0,40	0,40 à 0,70	0,035	≤ 0,035	0,60 à 0,90		3,00 à 3,50	
20NiCrMo2-2	1.6523	0,17 à 0,23	0,40	0,65 à 0,95	0,035	≤ 0,035	0,35 à 0,70	0,15 à 0,25	0,40 à 0,70	Aciers NiCrMo
20NiCrMoS2-2	1 6526					0,020 à 0,040				
17NiCrMo6-4	1 6566	0,14 à 0,20	0,040	0,60 à 0,90	0,035	≤ 0,035	0,80 à 1,10	0,15 à 0,25	1,20 à 1,50	
17NiCrMoS6-4	1 6569					0,020 à 0,040				
20NiCrMoS6-4	1 6571	0,16 à 0,23	0,40	0,50 à 0,90	0,035	0,020 à 0,040	0,60 à 0,90	0,25 à 0,35	1,40 à 1,70	
18CrNiMo7-6	1 6587	0,15 à 0,21	0,40	0,50 à 0,90	0,035	≤ 0,035	1,50 à 1,80	0,25 à 0,35	1,40 à 1,70	
14NiCrMo13-4	1 6657	0,11 à 0,17	0,40	0,30 à 0,60	0,035	≤ 0,035	0,80 à 1,10	0,10 à 0,25	3,00 à 3,50	

déduites de Grossmann (donc prenant en compte les paramètres de refroidissement) :

- taille de pièce ;
- efficacité du fluide de refroidissement, etc. ;
- et des formules de Just qui permettent une évaluation de la trempabilité à partir de la composition chimique de la nuance (cf. [M 1 115]).



**Figure 10 – Profils carbone nécessaires à différents aciers de cémentation pour obtenir une profondeur de cémentation de 1,20 mm (dureté conventionnelle de 52,5 HRC)**

• D'autres auteurs utilisent les courbes Jominy cémentées publiées par [25] ou calculées par la méthode Murry ([26] [27]).

Tous ces travaux ne prennent pas en compte l'influence de l'azote ; ils s'appliquent donc essentiellement aux pièces cémentées.

## 2.6 Influence de la composition chimique des aciers sur la dureté superficielle des couches cémentées ou carbonitrurées

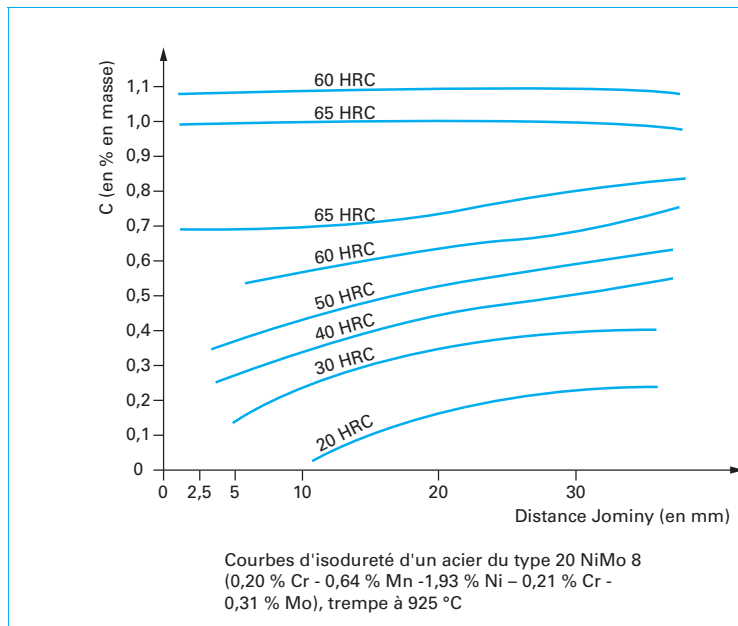
La dureté des couches cémentées dépend de leur teneur superficielle en carbone, des conditions de refroidissement, des éléments d'alliage de l'acier qui agissent sur la trempabilité de la couche, ainsi que nous l'avons vu au paragraphe précédent (§ 2.5.), mais aussi sur la proportion d'austénite résiduelle et d'une façon générale sur la microstructure, et des contraintes résiduelles de la couche.

Afin d'avoir une approche industrielle de cette caractéristique, Moulin *et al.* [16] ont tracé, pour quelques nuances de cémentation parmi les plus courantes, des courbes Jominy cémentées et, à partir de celles-ci, déterminé des zones d'isodureté qui permettent de définir les teneurs optimales en carbone qui conduisent aux duretés les plus élevées.

Par ailleurs, l'étendue des teneurs en carbone qui donnent les duretés les plus élevées permet une appréciation de la facilité de cémentation de la nuance si l'on considère comme but l'obtention d'une dureté élevée (figure 11).

Sur le principe, on peut cémenter ou carbonitrurer n'importe quelle nuance d'acier destinée au traitement thermique. Actuellement, avec les nouveaux procédés de cémentation, on réalise ces traitements sur des aciers à outils contenant jusqu'à 2 % de carbone avec un certain profit en ce qui concerne la résistance à l'usure.

Habituellement, pour la plus grande part du tonnage traité par ces procédés, on utilise des aciers à bas ou moyen carbone moyennement alliés. Le tableau 1 dresse une liste non exhaustive des nuances à l'intérieur desquelles on choisit généralement les aciers destinés à la cémentation ou à la



Carburation optimale déterminée d'après les courbes d'isoduretés d'éprouvettes Jominy cémentées	
Acier	Teneur superficielle (en C %)
16 MC 5	0,7 – 0,9
20 NCD 2	0,7 – 1
16 NCD 6	0,6 – 0,9
18 NC 13	0,6 – 0,85
12 NC 16	0,6 – 0,7
20 ND 8	0,7 – 1
20 NCD 8	0,7 – 0,9
18 CD 4	0,7 – 0,9
20 Mo Cr 4	0,6 – 0,85

**Figure 11 – Courbes Jominy d'éprouvettes cémentées et facilité de cémentation**

carbonitruration en indiquant, pour chacune d'elles, les teneurs obtenues avec un potentiel carbone de 0,8 %, ainsi que la sensibilité à l'oxydation interne.

## 2.7 Cas particulier des aciers inoxydables

■ Le cas des aciers riches en chrome de type martensitique a été développé au § 3.2 du [M 1 222] afin d'obtenir un bon compromis résistance à l'usure-résistance à la corrosion.

■ Sur les aciers inoxydables austénitiques, l'objectif est d'obtenir un durcissement en conservant les propriétés d'inoxydabilité, avec une phase austénitique maintenue sans précipitation de carbures (qui auraient pour effet d'appauvrir la teneur en chrome en solution). Il s'agit d'obtenir une austénite Fe - Cr sursaturée en carbone (jusqu'à 3 % en poids).

Cette austénite, appelée « phase S », est une phase métastable de dureté élevée 900 à 1 200 HV, qui s'obtient par une carburation entre 300 et 600 °C, soit dans un milieu plasma, soit dans un milieu gazeux avec des phases de dépassivation à l'aide de produits chlorés, soit en bains de sels de composition particulière. Les profondeurs de diffusion vont de 20 à 50 µm selon le temps et les procédés.

Ces traitements trouvent leurs applications là où de bonnes propriétés de frottement sont recherchées.

## 3. Caractéristiques de la couche de cémentation ou carbonitruration

### 3.1 Dureté superficielle

Le plus souvent, les contrôles d'atelier sont réalisés selon la méthode Rocwell C ou Rockwell A, pour les plus faibles profondeurs, voire en Rockwell superficiel HR45N ou HR15N. La fiabilité de ces mesures sous faible charge étant toute relative, il convient de confirmer la validité des mesures par des essais Vickers. Le choix de la charge d'essai Vickers doit tenir compte de la profondeur et du niveau de dureté.

Généralement, la dureté s'exprime à une valeur mini, majorée d'une valeur maxi tolérée, exemple : 680 HV + 150 HV ou 680 à 830 HV. Les valeurs de dispersion recommandées sur les duretés sont proposées dans le document CETIM élaboré en collaboration avec la profession (tableau 3).

### 3.2 Profondeur conventionnelle durcie

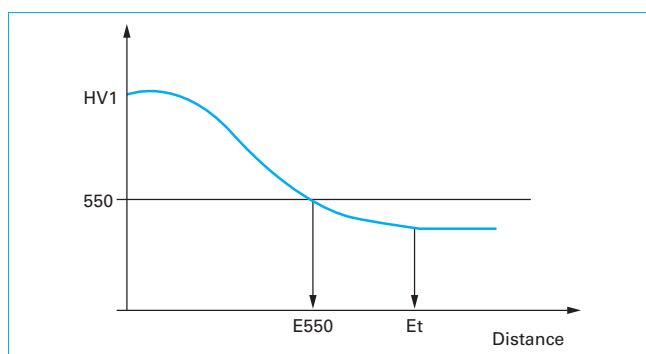
La norme NF A04 204 définit la détermination de l'épaisseur totale, ou conventionnelle, des couches minces durcies superficielles. Concernant les couches cémentées et ou carbonitrurées, la mesure s'effectue par filiation de dureté HV1, la couche conventionnelle DC est prise à la limite de 550 HV (figure 12) (symbolisée par DC550 ou Ec 550). Cette valeur correspond, après trempe, à une teneur en carbone de 0,32 % de carbone (tableau 4).

Il s'agit d'une définition conventionnelle, chaque entreprise a, bien entendu, la liberté de choisir une autre valeur, (à noter que les spécifications d'origine américaine spécifient une valeur à 50 HRC, soit 512 HV). Il y aura donc nécessairement un décalage de profondeur entre deux spécifications faisant référence à des valeurs conventionnelles différentes.

Lorsque la dureté à cœur, compte tenu de la teneur en carbone de l'acier de base, est proche de la valeur 550 HV, la définition conventionnelle sera prise à une autre valeur, 650 HV par exemple,

**Tableau 3 – Dispersions recommandées sur les valeurs de dureté superficielles**

Dispersion en dureté superficielle HV			
Sur une pièce		Dans un lot	
< 500 HV	> 500 HV	< 500 HV	> 500 HV
45	80	80	140
Dispersion en dureté superficielle HRC			
Sur une pièce		Dans un lot	
< 50 HRC	> 50 HRC	< 50 HRC	> 50 HRC
4	4	7	7
Dispersion en dureté superficielle HRA			
Sur une pièce		Dans un lot	
< 75 HRA	> 75 HRA	< 75 HRA	> 75 HRA
2	2,5	3,5	4



**Figure 12 – Définition conventionnelle de la couche cémentée ou carbonitrurée**

comme il est souvent le cas après carbonitruration sur des aciers plus chargés en carbone qu'en cémentation.

### 3.3 Profondeur totale enrichie

Elle correspond au point où la teneur en carbone de l'acier non enrichi est retrouvée. Cette valeur est parfois spécifiée, car elle donne une bonne indication sur la reproductibilité du procédé, notamment sur l'absence de retouche et l'intensité du gradient de carbone.

Elle est importante lorsque la pièce présente des parties minces, ce qui nécessite de garder entre les deux couches face à face une zone ductile.

Elle a également un effet sur la répartition et le niveau des contraintes après trempe.

### 3.4 Profondeur à un niveau de dureté intermédiaire

Spécifier une valeur de dureté intermédiaire (allure du gradient de dureté) entre la surface et la profondeur conventionnelle permet de reproduire un gradient d'enrichissement et de durcissement imposé avec, ainsi, un niveau de contraintes résiduelles reproductible.

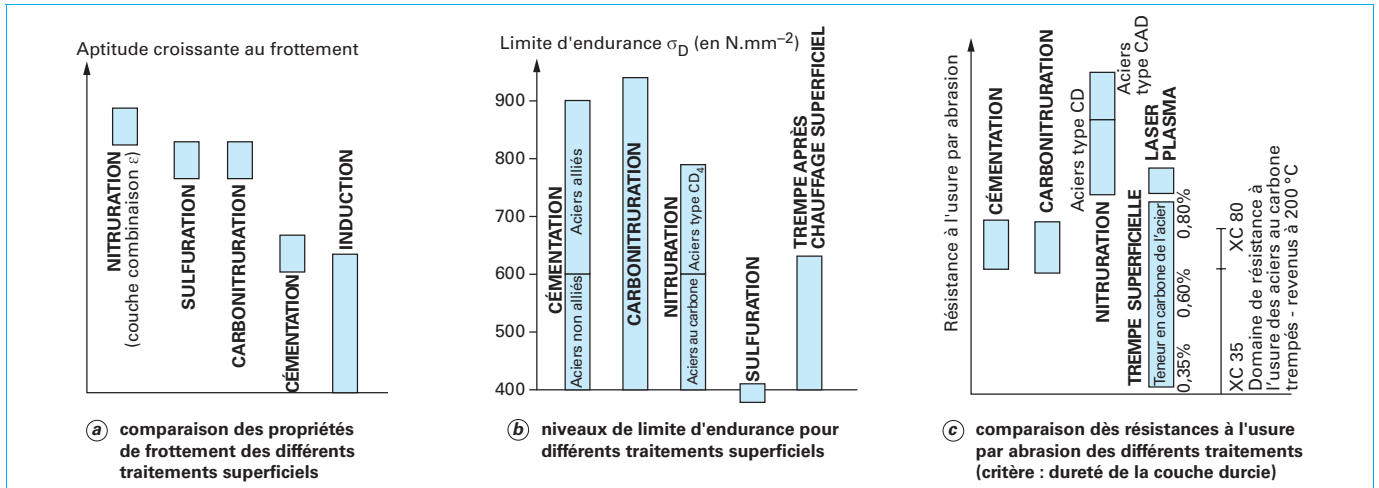


Figure 13 – Comparaison de quelques propriétés d'emploi des principaux traitements thermiques de surface

Tableau 4 – Tolérances recommandées sur les profondeurs de cémentation et carbonituration (recommandation CETIM)

Profondeur conventionnelle de cémentation (en mm)	Tolérance minimale (en mm)
$0,3 \leq e \leq 0,6$	+ 0,2
$0,6 \leq e \leq 1,2$	+ 0,3
$1,2 \leq e \leq 2$	+ 0,5
$e \geq 2$	+ 0,7

Cette spécification se justifie également dans le cas de contraintes de roulement profondes pour lesquelles le gradient de caractéristiques doit être en relation avec le gradient des contraintes en cisaillement.

### 3.5 Exigences de microstructure

Généralement, ces traitements font l'objet d'une spécification précisant les limites de structures acceptables en termes d'austénite résiduelle, de carbures libres, de réseaux d'oxydes ou de défauts de structure superficielle.

Des exigences de microstructure à cœur, comme la ferrite libre, peuvent être également demandées.

### 3.6 Composition en carbone et azote de la surface

Même si l'obtention de la dureté et des microstructures sont en relation avec la teneur en carbone (et azote dans le cas de la carbonituration), le souci de reproductibilité des résultats conduit à spécifier le gradient de carbone (et azote) de la couche enrichie (cf. figure 14 [M 1 225]).

### 3.7 Niveau des contraintes résiduelles

L'importance des contraintes résiduelles sur le renforcement mécanique des pièces traitées a été décrite en [M 1 225].

Bien que difficiles à évaluer, il peut être intéressant de spécifier les valeurs superficielles en compression. La mesure des contraintes est alors effectuée par des rayons X.

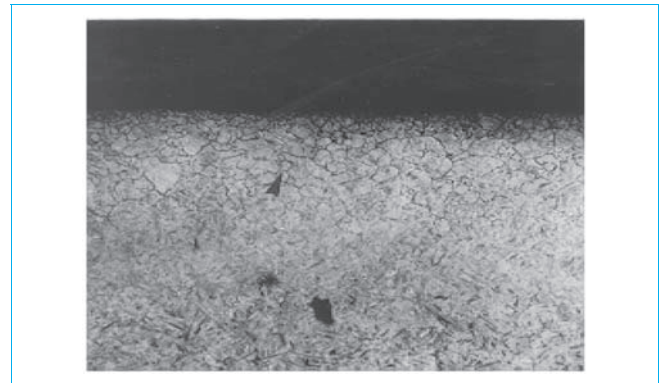


Figure 14 – Réseaux de carbonitrides

## 4. Propriétés des pièces cémentées ou carbonitrurées

Compte tenu du rôle important des surfaces des pièces mécaniques (les propriétés de surface conditionnent la tenue des pièces en frottement, usure et fatigue), on cherche souvent à réaliser des couches superficielles de propriétés particulières (notamment de dureté élevée) s'appuyant sur un cœur peu fragile (donc moins dur) donnant à la pièce, dans son ensemble, une combinaison exceptionnelle de propriétés (résistance au frottement, à l'usure, à la fatigue et ténacité).

**On rencontrera donc très souvent, en mécanique, la macrostructure suivante :**

- une **couche superficielle** présentant, en général, une dureté élevée ( $\approx 700$  HV ou plus), et dans laquelle le matériau est soumis à des contraintes résiduelles de compression importantes (plusieurs centaines de MPa) ; l'épaisseur de cette couche peut varier de 0,1 à plusieurs millimètres ;
- un **cœur** constituant la partie restante de la pièce, de dureté beaucoup plus faible (inférieure en général à 400 HV).

La cémentation et la carbonituration permettent d'obtenir de telles structures conférant aux pièces de très hautes caractéristiques de résistance au roulement et à la fatigue et, d'une façon générale, de bonnes propriétés d'ensemble par rapport aux autres traitements à la disposition du mécanicien (figure 13).

On pourrait être surpris *a priori* par les dispersions importantes des caractéristiques d'emploi mises en évidence sur cette figure 13.

Mais, il faut avoir présent à l'esprit que la tenue en service des pièces mécaniques est étroitement liée aux microstructures et macrostructures obtenues après traitement (cf. § 4.1).

L'étude de la relation entre la structure et les propriétés de service des pièces cémentées et carbonitrurées a donné lieu à de nombreuses publications dont les principaux résultats sont rassemblés dans les tableaux 5 et 6.

**Tableau 5 – Influence de différents paramètres de structure sur les propriétés mécaniques des couches cémentées**

Paramètres de la structure		Sollicitations de service			
		Fatigue ( $\sigma_D$ )	Fatigue superficielle	Frottement	Usure
MACROSTRUCTURE	Épaisseur cémentée ( $e_c$ )	Optimale pour : $\frac{e_c}{e_p} = 0,07$ valable pour $e_p < 12$ mm	$e_c = 2 e_z$ préconisée	Sans influence notable	$e_c > T_u$ préconisée
	Résistance à cœur ( $R_m$ )	Optimale pour $R_m$ comprise entre 1 080 et 1 240 N/mm <sup>2</sup>	Optimale pour $R_m$ comprise entre 850 et 1 150 N/mm <sup>2</sup>	Sans influence notable	Sans influence notable
MICROSTRUCTURE	Austénite résiduelle ( $\gamma_R$ )		Peu d'influence jusqu'à $\gamma_R = 25$ %	Sans influence jusqu'à $\gamma_R = 50$ %	Dépend de l'instabilité de $\gamma_R$
	Carbures	Réseaux	Défavorable	Sans influence notable	Favorable
		Nodules	Sans influence	Sans influence notable	Favorable
	Perlite – bainite (épaisseur d'oxydation interne)		Défavorable au-delà de 6-10 $\mu$ m	Sans influence notable	Défavorable

(1) Notations :  
 $e_c$  épaisseur cémentée,  
 $e_p$  épaisseur pièce,  
 $e_z$  épaisseur de cisaillement maximal dû aux contraintes de Hertz,  
 $T_u$  tolérance d'usure,  
 $\sigma_D$  limite d'endurance en flexion rotative.

**Tableau 6 – Influence de différents paramètres de structure sur les propriétés mécaniques des couches carbonitrurées**

Paramètres de la structure		Sollicitations de service			
		Fatigue ( $\sigma_D$ )	Fatigue superficielle	Frottement	Usure
MACROSTRUCTURE	Épaisseur carbonitrurée ( $e_c$ )	$\sigma_D$ optimale pour : $\frac{e_c}{e_p} = 0,07$ et $e_p < 12$ mm	$e_c = 2 e_z$ préconisée	Sans influence notable	$e_c > T_u$ préconisée
	Résistance à cœur ( $R_m$ )	$\sigma_D$ optimale pour $R_m$ comprise entre 1 300 et 1 500 N/mm <sup>2</sup>	Optimale pour $R_m$ comprise entre 850 et 1 100 N/mm <sup>2</sup>	Sans influence notable	Sans influence notable
MICROSTRUCTURE	Austénite résiduelle ( $\sigma_R$ )		Favorable jusqu'à $\sigma_R = 60$ %	Favorable jusqu'à $\sigma_R = 70$ %	Dépend de l'instabilité de $\sigma_R$
	Carbonitrures	Réseaux	Défavorable	Sans influence	Favorable
		Nodules	Sans influence	Sans influence	Sans influence
	Porosités		Défavorable		

(1) L'absence d'indication dans certaines cases indique que les données en notre possession ne permettent pas de dégager des tendances précises.  
 Notation :  $\sigma_D$  limite d'endurance en flexion rotative,  $e_c$  épaisseur carbonitrurée,  $e_p$  épaisseur de la pièce,  $e_z$  profondeur maximale de cisaillement dû aux contraintes de Hertz  $T_u$  tolérance d'usure.

## 4.1 Comportement des structures obtenues par cémentation vis-à-vis des sollicitations de service

### ■ En fatigue

La microstructure optimale doit présenter :

- des teneurs en austénite résiduelle inférieures à 25-30 % ; on constate un abaissement de la limite de fatigue de 10 % par tranche de 30 % d'austénite ;
- des épaisseurs d'oxydation interne (perlite et bainite) inférieures à 6-10  $\mu\text{m}$  ; ce constituant très nuisible peut, pour des épaisseurs de 30  $\mu\text{m}$ , faire chuter la limite de fatigue de 45 % ;
- une absence de carbures en réseaux alors que l'on peut tolérer ce constituant s'il est réparti dans la structure et en nodules.

Pour les paramètres de la macrostructure, on notera qu'un optimum semble se dégager pour :

- des résistances à cœur en sous-couche comprises dans le domaine 1 080-1 240 MPa ;
- un rapport épaisseur cémentée/épaisseur pièce de 7 % environ, valeur établie pour des pièces ou partie de pièces (dent d'engrenage par exemple) d'épaisseur inférieure à 12-15 mm.

### ■ En fatigue superficielle (roulement)

La microstructure superficielle influe peu sur cette caractéristique et l'austénite résiduelle peut être tolérée jusqu'à des valeurs élevées (environ 50 %), les autres constituants étant sans influence notable. Pour la macrostructure, on préconise généralement la réalisation d'une épaisseur de traitement double de la profondeur du cisaillement maximal dû aux contraintes de Hertz.

Il semble, en outre, qu'une résistance à cœur comprise entre 850 et 1 150 N/mm<sup>2</sup> soit légèrement favorable.

### ■ Frottement (glissement)

Pour cette sollicitation très superficielle, la macrostructure est sans action notable et l'influence de la microstructure a été peu étudiée. Il semble toutefois que les constituants mous tels que ferrite (due à la décarburation) ou austénite (si elle n'est pas instable, c'est-à-dire si elle n'a pas tendance en fonctionnement à se transformer en martensite) soient défavorables.

### ■ Usure

C'est la couche cémentée durcie qui résiste à l'usure ; de ce fait, il sera nécessaire que l'épaisseur de traitement soit supérieure à l'épaisseur d'usure que l'on tolère sur la pièce, car le cœur sera peu résistant. En ce qui concerne la constitution de la couche cémentée, on notera que la décarburation et l'oxydation interne ont une action défavorable sur la résistance à l'usure.

Par contre, les carbures sont bénéfiques ; le rôle de l'austénite dépend de son instabilité, il est donc difficile à apprécier dans la pratique courante.

## 4.2 Comportement des structures obtenues par carbonituration vis-à-vis des sollicitations de service

Le tableau 6 montre que l'influence de la structure sur la tenue aux sollicitations de service est, dans les grandes lignes, semblables à celle étudiée dans le cas de la cémentation. Quelques différences doivent cependant être mentionnées.

### ■ En fatigue

Pour ce type de sollicitation, on peut tolérer plus d'austénite résiduelle qu'en cémentation (jusqu'à 60 % environ). Certains auteurs recommandent même un minimum d'au moins 25 %.

**On notera également la valeur plus élevée de l'optimum des résistances à cœur (1 300-1 500 N/mm<sup>2</sup>) et l'influence très défavorable des porosités superficielles.**

### ■ En fatigue superficielle

On tolérera également une quantité plus importante d'austénite résiduelle qu'en cémentation, jusqu'à 70 %.

La transformation en service de l'austénite résiduelle en martensite provoque une augmentation de volume qui peut modifier les conditions géométriques de fonctionnement et ainsi conduire à des inconvenients (tolérances dimensionnelles modifiées, etc.) qui peuvent causer la destruction de la pièce.

#### Remarque

Les valeurs indiquées ici ne prennent pas en compte ce phénomène.

## 5. Normalisation et spécifications

Il n'existe pas en France de norme de procédé en ce qui concerne la cémentation et la carbonituration.

Il existe par contre :

- des normes sidérurgiques concernant les aciers destinés à subir une cémentation ou une carbonituration ; (EN 10084, cf. tableau 2) ;
- des normes de contrôle du résultat ;
- des spécifications d'utilisateurs qui sont de gros consommateurs de ces traitements qui en exigent une très bonne qualité : PSA, Renault, l'aéronautique, les fabricants d'engrenages ;
- un certain nombre de spécifications plus individualisées, rédigées par des utilisateurs petits ou gros afin de mieux contrôler leurs sous-traitants.

Sur le plan international, différents pays se sont dotés d'un système normatif très complet dans lequel on trouve des normes concernant la cémentation et la carbonituration.

**Nota** : une liste de documents normatifs et de normes est donnée dans la fiche documentaire *Pour en savoir plus*.

## 6. Défauts et déformations

### 6.1 Défauts

Même si les déformations peuvent être, à juste titre, considérées comme des défauts de cémentation et carbonituration, la distinction est faite ici entre elles et les défauts ou anomalies que peuvent présenter les pièces traitées : points doux, présence de carbures ou carboniturations, etc.

Comme une opération de traitement thermochimique fait intervenir en réalité beaucoup de séquences – stockage, manutention, lavage, traitement thermochimique, éventuelle reprise d'usinage, éventuelle reprise en traitement, grenailage, revenu, parachèvement, etc. – chacune d'elle peut être la source d'une anomalie qui se répercutera sur le produit final et sur sa qualité.

La mise en évidence des anomalies de traitement suppose [10] des :

– **contrôles d'atelier** :

- aspect visuel à l'état tel et après grenailage, qui permet de soupçonner certains cas de points doux,
- mesures de dureté superficielle par prélèvement, la charge sous laquelle se font ces mesures de dureté dépendant de l'épaisseur de la couche visée (tableau 7),
- mesures de dureté en sous-couche après meulage,

**Tableau 7 – Relation entre dureté à mesurer, épaisseur de la couche traitée et charge à appliquer – Exemple de l'essai Vickers**

Épaisseur minimale de la couche (en mm)	Dureté Vickers minimale de la couche							
	200 < HV ≤ 300	300 < HV ≤ 400	400 < HV ≤ 500	500 < HV ≤ 600	600 < HV ≤ 700	700 < HV ≤ 800	> 800 HV	
0,05	.....	.....	.....	HV 0,5	HV 0,5	HV 0,5	HV 0,5	
0,07	.....	HV 0,5	HV 0,5	HV 0,5	HV 0,5	HV 1	HV 1	
0,08	HV 0,5	HV 0,5	HV 0,5	HV 0,5	HV 1	HV 1	HV 1	
0,09	HV 0,5	HV 0,5	HV 0,5	HV 1	HV 1	HV 1	HV 1	
0,10	HV 0,5	HV 1	HV 1	HV 1	HV 1	HV 1	HV 1	
0,15	HV 1	HV 1	HV 3	HV 3	HV 3	HV 3	HV 3	
0,20	HV 1	HV 3	HV 3	HV 5	HV 5	HV 5	HV 5	
0,25	HV 3	HV 5	HV 5	HV 5	HV 10	HV 10	HV 10	
0,30	HV 3	HV 5	HV 10	HV 10	HV 10	HV 10	HV 10	
0,40	HV 5	HV 10	HV 10	HV 10	HV 10	HV 30	HV 30	
0,45	HV 5	HV 10	HV 10	HV 10	HV 30	HV 30	HV 30	
0,50	HV 10	HV 10	HV 10	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	
0,55	HV 10	HV 10	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	
0,60	HV 10	HV 10	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	
0,65	HV 10	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	
0,70	HV 10	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	
0,75	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	HV 30	

- contrôles par moyens non destructifs (courants de Foucault, ondes de surface, etc.) qui permettent de faire du contrôle à 100 % et discriminent les pièces mauvaises,

- mesures de déformations,

- aspect visuel des pièces après usinage pour éliminer les criques de rectification ;

– **contrôles de laboratoire :**

- examens métallographiques de la qualité des couches,

- filiations de microdureté sur coupes,

- analyses chimiques pour déterminer les teneurs en carbone et/ou azote superficielles, éventuellement le gradient en profondeur (méthode du clinquant, dosage de copeaux, etc.).

**Remarque**

Les défauts de microstructure de la couche enrichie et du cœur après durcissement par trempe sont listés dans le tableau 8, et les autres défauts dans le tableau 9.

### 6.1.1 Autres anomalies de structures

#### ■ Décarburation

Par suite d'une anomalie d'atmosphère, le plus souvent caractérisée par une introduction d'air (ex : passage dans un sas avant trempe mal purgée, oxydation lors d'une reprise de trempe), ou par un séjour dans une zone dont le potentiel carbone est insuffisant (ex : disfonctionnement du contrôle de l'atmosphère), on assiste à un appauvrissement du carbone à la surface de l'acier à traiter (figure 15).

Suivant les cas, la décarburation peut-être partielle ou totale, avec apparition de ferrite. D'un point de vue métallographique, ce défaut se manifeste par une teneur en carbone superficielle inférieure à la teneur en carbone en sous couche.

#### ■ Moyens de détection :

- métallographie après attaque nital ;
- filiation de dureté superficielle ;
- dureté superficielle sous faible charge.

#### ■ Ferrite à cœur

La transformation intervenue à cœur est incomplète et présente des îlots de ferrite dans la structure le plus souvent martensitique ou bainitique. Ce défaut est directement à corrélérer à la trempabilité de l'acier, et aux conditions de refroidissement lors de la trempe.

L'effet peut être défavorable sur la tenue en fatigue dans le cas de sollicitations sévères et profondes. La ferrite est de type équiaxe ou aciculaire.

**Moyens de détection :** métallographie après attaque nital.

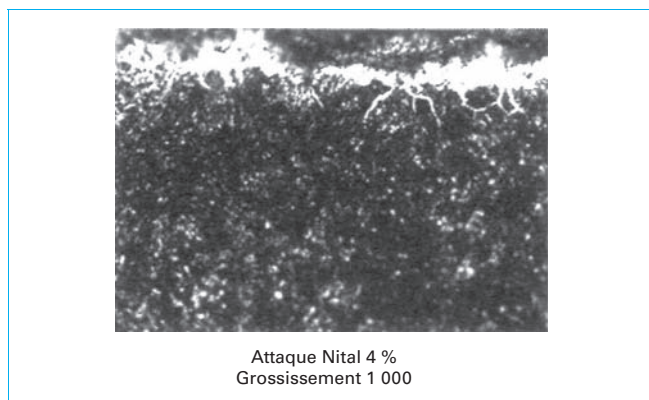
#### ■ Structure incorrecte à cœur

Le prescripteur peut avoir des exigences de structures à cœur particulières telles que absence de bainite supérieure, de ferrite... Ce sont les conditions de trempe après cémentation qui déterminent les résultats.

**Moyens de détection :** métallographie sans ou après attaque nital

**Tableau 8 – Défauts de microstructures de la couche enrichie et du cœur après durcissement par trempe en relation avec les causes possibles**

	Équilibre de l'atmosphère	T° de cémentation ou carbonituration	Durée du palier de cémentation	T° et durée du palier avant trempe	Acier composition structure trempabilité	Étanchéité du four	Homogénéité du four	Gaz d'addition	Propreté des pièces avant traitement	Conditions de trempe
Carbures en réseaux, [M 1 225]	X	(X)					X	X		
Carbures en paquets ou en nodules [M 1 225]	X	(X)						X		
Austénite résiduelle [M 1 225]	X	X		X	X			X		X
Réseaux d'oxydes [M 1 225]	X				X	X				
Réseaux ou précipités de carbonitrides (figure 14)	X				X			X		
Défauts de structure superficielle (perlite fine, « troostite ») (figure 16)	X				X	X				X
Décarburation (figure 15)	X					X				
Structure à cœur non conforme		(X)		X	X		(X)			X
Ferrite à cœur					X					X
Bainite dans la couche durcie				X	X		(X)			X

**Figure 15 – Décarburation superficielle****6.1.2 Autres défauts**

Se reporter au tableau 9.

■ **Durété superficielle insuffisante**

Les principales sources de ce défaut sont un potentiel carbone insuffisant, un taux d'austénite élevé, une trempe pas assez sévère pour la trempabilité de l'acier. On peut également ajouter un pilotage de l'opération revenu mal maîtrisé.

■ **Plages douces superficielles**

Il peut s'agir de défauts de trempe en relation avec les conditions de refroidissement, de défauts d'enrichissement en carbone en relation avec des barrières à la diffusion dont les causes peuvent être multiples et souvent difficiles à diagnostiquer même si la source principale est la propreté physico-chimique de cette surface. Les contacts entre pièces ou avec leurs supports peuvent perturber à la fois la diffusion ou les conditions de refroidissement.

La trempe peut également être une source de plages douces.



**Tableau 9 – Autres défauts de cémentation et carbonituration en relation avec les causes possibles**

	Équilibre de l'atmosphère	T° de cémentation ou carbonituration	Durée du palier de cémentation	T° et durée du palier avant trempe	Acier composition structure trempabilité	Étanchéité du four	Homogénéité du four	Gaz d'addition	Propreté des pièces avant traitement	Conditions de trempe
Dureté superficielle insuffisante	X	X		X	X	X		X	X	X
Plages douces superficielles					(X)	(X)	(X)		X	X
Manques ou irrégularités de carburation	(X)				(X)	X	X	X	X	
Dureté à cœur insuffisante				X	X		(X)			X
Teneur en carbone superficielle trop forte	X	X					(X)	X		
Teneur en carbone superficielle trop faible	X	X				X	(X)	X	(X)	
Formation de pellicules peblables ou peluches (fig. 18)						X				
Déformations : variation volumiques et distorsions géométriques		X	(X)	(X)	X		(X)			X
Dépôts de suie sur les pièces	X	X				X	X	X	X	
Profondeur durcie insuffisante	X	X	X	X	X		(X)	X		X
Profondeur durcie trop importante	X	X	X	X	X		(X)	X		
Gradient de concentration de carbone ou carbone et azote en surface non nul ou non décroissant	X							X		(X)
Remontée de dureté en sous couche ou gradient de dureté en surface non nul ou non décroissant	X					X		X		X
Porosités								X (NH3)		
Propreté insuffisante	X					X		X	X	X

### ■ Manques ou irrégularités de carburation

Ce défaut est proche du précédent, les plages douces ne présentent pas de la qualité de la carburation, ici la diffusion de carbone a été absente ou insuffisante à certains emplacements. Les causes peuvent être également multiples :

- mauvais dégraissage ;
- imprégnation de la surface par des produits passivants ou bloquant la diffusion ;
- contact entre les pièces ou avec les montages ;
- mauvaise répartition des flux dans l'enceinte du four.

### ■ Dureté à cœur insuffisante

(Il s'agit évidemment d'un défaut qui n'est pas spécifique à la cémentation, mais commun avec les traitements de trempe à cœur.).

Ce sont les conditions de trempe qui sont déterminantes : température du dernier palier avant trempe et les conditions de refroidissement.

### ■ Teneur en carbone superficielle trop forte

Le potentiel carbone en fin de cycle est trop élevé par rapport à la consigne demandée. Il s'agit naturellement d'un défaut de régulation ou de pilotage de l'atmosphère.

Les causes peuvent être nombreuses :

- écarts sur les températures affichées ;
- écarts sur les analyses d'atmosphère :
  - défaut de prélèvement (prise d'air, écart de température, obturation par les suies des tubes de prélèvement),
  - mauvais étalonnage des analyseurs,
  - sonde à oxygène défailante ;
- défauts de pilotage :
  - apports de gaz carburant excessif,
  - surcarburation en phase d'enrichissement sans possibilité d'atteindre la consigne en phase de fin de carburation ;
- **homogénéité du four non conforme**, écarts avec les zones de prélèvement ou de mesure.

### ■ Teneur en carbone superficielle trop faible

Le potentiel carbone en fin de cycle est trop faible par rapport à la consigne demandée. À noter que ce défaut n'est pas nécessairement identifiable par la valeur de dureté superficielle obtenue. Toutes les raisons données pour le potentiel carbone trop fort sont à considérer.

Toutefois, pour le défaut de pilotage il faut inverser les conditions d'excès en conditions d'insuffisance.

### ■ Formation de pellicules : « pelages ou peluches »

Une fine calamine détachable et facile à éliminer par broissage s'est formée à la surface des pièces enfournées (figure 16). On peut attribuer ce défaut à un apport d'air fugitif lors du transfert de trempe de la charge, mais également à un mauvais séchage des pièces avant enfournement.

On s'aperçoit très rapidement de ce dernier problème car le système de pilotage du potentiel carbone a d'énormes difficultés à atteindre la consigne fixée.

### ■ Dépôts de suie sur les pièces

Ce défaut est le révélateur d'un potentiel carbone trop élevé de l'atmosphère parfois favorisé par le contact avec des outillages déjà recouverts de suie. Un potentiel carbone élevé peut également être induit par la présence de zone froide dans l'enceinte du four.

### ■ Profondeur durcie insuffisante

Les conditions associées sont le temps, la température, le pilotage en potentiel carbone de l'atmosphère. Dans une moindre mesure la trempabilité de l'acier ou les conditions de trempe peuvent être en cause, surtout si la dureté en sous couche est trop faible.

### ■ Profondeur durcie trop importante

Les conditions inversées sont celles d'une profondeur trop faible.



Figure 16 – Aspect d'un « peluchage »

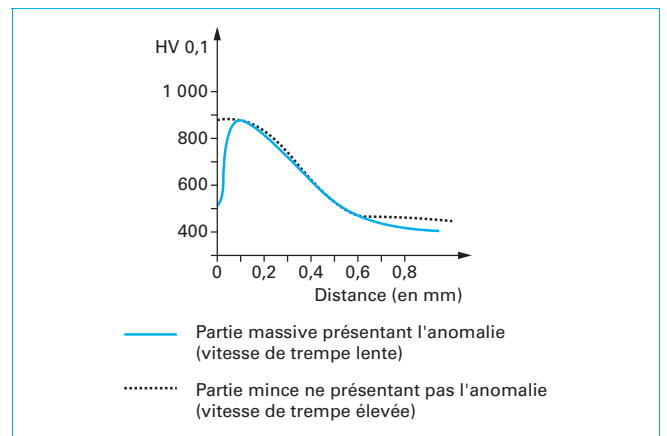


Figure 17 – Exemple d'anomalie de trempe sur une pièce en acier 27 CD 4 carbonitrurée

### ■ Gradient de concentration (non nul ou non décroissant) de carbone, ou carbone et azote, en surface

Ce défaut est considéré du point de vue concentration en interstitiels. Un cas particulier de gradient de carbone non nul en surface ou non décroissant peut être observé dans le cas de l'application de programmes de cémentation optimisée avec un fort taux de carbone en première partie de cycle alors que la seconde partie se déroule sur un temps insuffisant.

La teneur en carbone superficielle est ramenée à la valeur demandée par apport d'air par exemple alors que la diffusion n'est pas suffisante pour abaisser la teneur en carbone dans la région proche de la surface.

### ■ Remontée de dureté en sous couche, ou gradient de dureté en surface, non nul ou non décroissant

Ce défaut peut être dû à des anomalies de structure tels qu'austénite résiduelle, carbonitrides, décarburation. Il peut être également lié à une **anomalie de trempe**, il s'agit d'un phénomène caractéristique en carbonituration et qui se traduit par une chute de dureté superficielle sur quelques centièmes de millimètre (figure 17 [23]) dont l'origine est en relation avec la formation de carbonitrides de certains éléments d'alliage (chrome, manganèse, molybdène).

Au moment du durcissement par trempe, ces éléments d'alliage ne participent plus à la trempabilité de la couche superficielle. Il y a alors formation de constituants intermédiaires (perlite, bainite) et chute de dureté consécutive.

Les remèdes sont divers :

- augmenter dans la mesure du possible la sévérité de trempe ;
- abaisser pour les très grosses pièces la teneur en azote de l'atmosphère, afin d'éviter la formation de carbonitrides ;
- augmenter la trempabilité intrinsèque de l'acier ;
- rechercher une nuance différente d'acier, dans laquelle les éléments d'alliage sont moins sujets à la formation de carbonitrides.

**■ Propreté des surfaces traitées insuffisante**

Les surfaces sont colorées et/ou tachées à la sortie du four. La première vérification est la propreté des pièces avant traitement. La qualité de l'atmosphère interviendra si la surface présente des dépôts de suie. La propreté ou l'état de l'huile de trempe (degré d'oxydation, pollution par un manque de filtration, craquage) est également un paramètre très important à suivre.

**6.2 Déformations : variation volumiques et distorsions géométriques**

D'une manière générale, la problématique des déformations lors de ces traitements n'est pas fondamentalement différente de celle des traitements thermiques dans la masse.

Comme tous les traitements de durcissement par transformation martensitique, la cémentation et la carbonituration, suivie d'une

trempe, induisent des déformations des pièces traitées. Il faut distinguer variations volumiques et distorsions. La variation de volume due à la transformation de l'austénite en martensite suit la loi suivante :  $4,64 - 0,53 \times (\%C)$ . Ainsi, les variations volumiques seront d'autant plus importantes que la teneur en carbone sera élevée.

Cependant, les variations volumiques et distorsions géométriques observées peuvent avoir d'autres causes :

- **asymétrie du transfert de la chaleur** : il est important de limiter les variations de température au sein des pièces pendant le chauffage, et également pendant la trempe ;
- **aspect dimensionnel** : principalement observé sur les axes longs et de petits diamètres, ce phénomène est appelé « fléchage » ou « flambage » (risque si  $L > 5 d$ ). Dans cette situation, il est important de travailler en étroite collaboration avec le fournisseur de montages en réfractaire. Un fluage peut également intervenir lorsque la masse en suspension sur le montage est importante et les temps de séjour dans le four très longs ;
- **structure métallurgique des pièces à traiter** : la présence de bandes marquées de ferrite et de perlite sur des arbres, par exemple, induira un allongement de ces pièces. Pour remédier à ce problème, il est important de travailler sur l'état de livraison avec l'aciériste ou le forgeron. Des traitements thermiques permettent de régénérer la structure après forgeage ou laminage ;

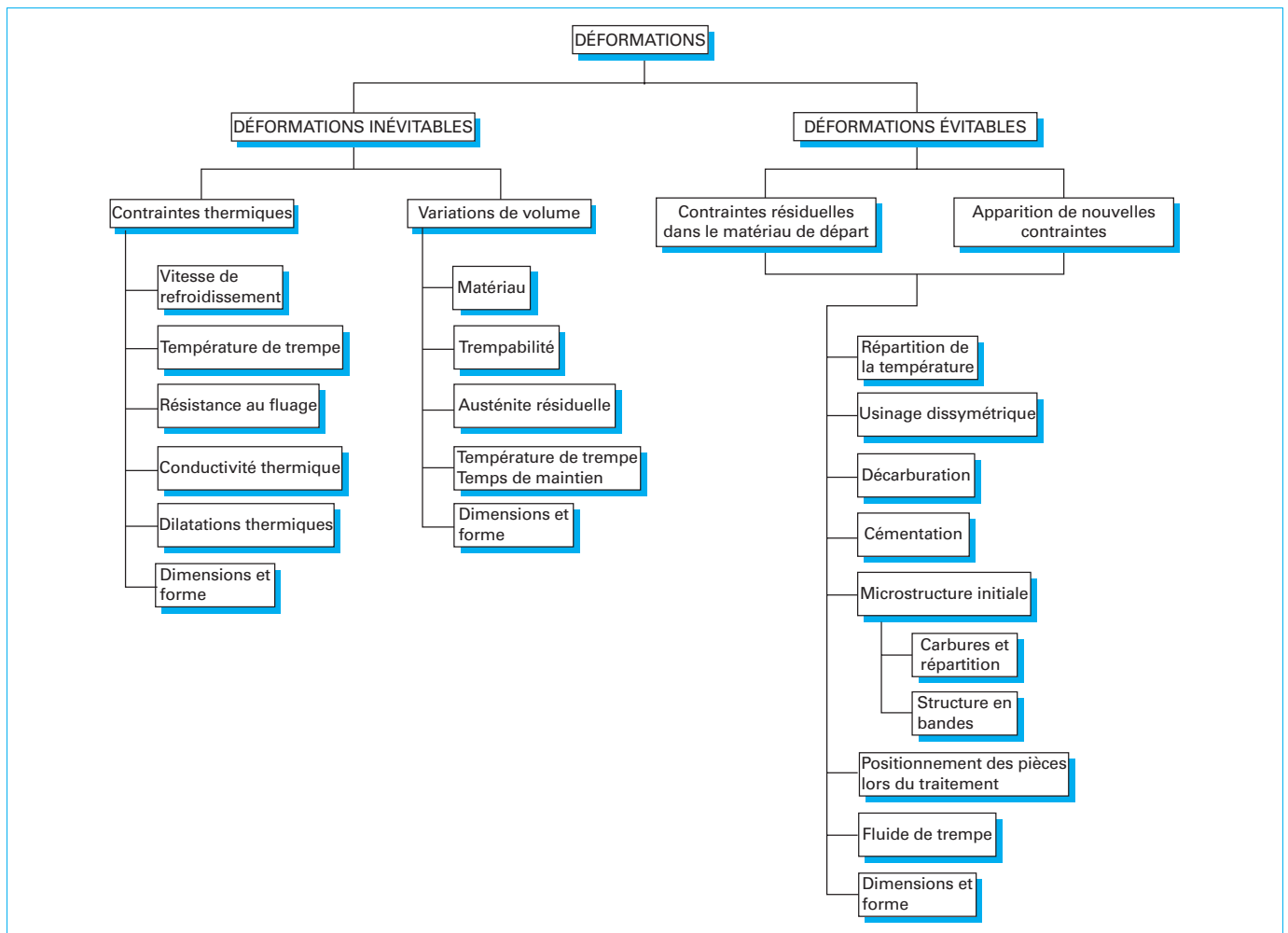


Figure 18 – Origines des déformations en traitement thermique

- **usinage** : un enlèvement asymétrique de la matière, l'état des outils, les paramètres d'usinage, le fluide de refroidissement, tous ces paramètres peuvent induire des contraintes résiduelles de traction dans les pièces qui se relâcheront pendant le chauffage ;
- **opérations de mise en forme à froid** : pour les mêmes raisons que l'usinage, elles induisent également des contraintes de traction ;
- **symétrie des couches durcies** : une barre prismatique non cémentée sur des faces sera plus déformée que celle cémentée sur les quatre faces ;
- **ne pas exclure les déformations plastiques à chaud** par contact avec les montages de présentation dans le four (exemple : marquage de dents d'engrenage au contact d'une grille).

La problématique pour les mécaniciens et les métallurgistes ne réside pas dans les déformations, car il est possible de les anticiper, dans le meilleur des cas, lorsqu'elles sont reproductibles. Dans le cas contraire, il faut soit travailler, non sans peine, sur l'homogénéité des paramètres de la gamme de fabrication de l'aciériste en passant par la mise en forme ou l'usinage, soit ajouter une sur-paisseur de rectification ou d'usinage dur pour atteindre les côtes au plan du produit fini.

La figure 18 [28] récapitule, de manière générale, les paramètres qui interviennent dans les déformations lors des traitements thermiques en général.

Pour rester concret, les paragraphes qui suivent illustrent, à partir de cas réels, l'évolution de certaines cotes à la suite d'une cémentation ou d'une carbonituration suivie d'un durcissement par trempe.

### 6.2.1 Cémentation gazeuse

Le lecteur pourra se référer à la référence bibliographique [29].

#### ■ Pignons d'attaque de différentiel

La figure 19 [29] donne les variations dimensionnelles du diamètre primitif de la denture de pignons d'attaque de différentiel après

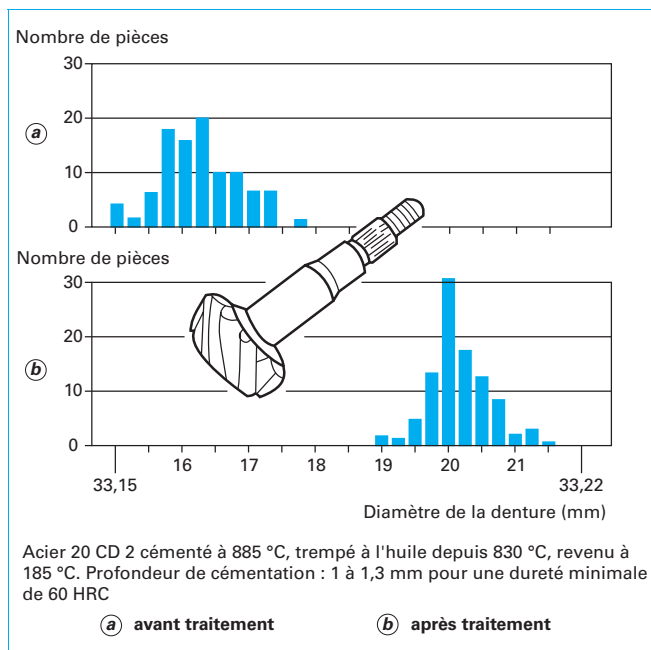


Figure 19 - Variations dimensionnelles du diamètre primitif de la denture de pignons d'attaque de différentiel après cémentation et durcissement par trempe

cémentation, durcissement par trempe à l'huile et revenu. Les mesures ont été faites sur un échantillon de 100 pièces.

#### ■ Diamètre intérieur de pignons de différentiel

La figure 20 [29] montre les variations dimensionnelles du diamètre intérieur de pignons de différentiel ayant subi une trempe en bain de sels après cémentation. Il s'agit là d'une pratique visant à diminuer l'amplitude des déformations à la trempe.

### 6.2.2 Carbonituration gazeuse

Le lecteur pourra se référer à la référence bibliographique [23] de l'article.

La figure 21 [29] illustre l'effet de la température de carbonituration sur les variations dimensionnelles de trois types de pièces. Toutes les pièces, en XC 10, ont été traitées en four à charge à des températures variant de 790 à 845 °C. L'atmosphère est de type endothermique (débit : 7,1 m<sup>3</sup>/h). La température de rosée est maintenue entre -1 et -4 °C. Les durées de traitements ont été ajustées en fonction de la température pour une profondeur visée de 0,13 à 0,20 mm.

Le même nombre de pièces a été chargé à la main dans des paniers et traité. Les pièces illustrées (figure 21a et 21b) ont été positionnées verticalement ; les pièces (figure 21c) ont été chargées en vrac ; la trempe s'est faite dans de l'huile moyennement agitées à 60-70 °C.

Les données de la figure 21 représentent huit fournées pour les pièces de la figure 21a et trois fournées pour celles des figures 21b et 21c. Toutes les pièces étaient dans les tolérances de diamètre intérieur avant carbonituration.

Les résultats montrent que les déformations les plus faibles ont été obtenues pour la plus basse température. Pour les pièces de la figure 21c, il n'y a pas eu d'effet de la température sur les cotes mesurées.

### 6.2.3 Prévention des déformations

Le praticien craint moins les déformations systématiques que les déformations aléatoires. En effet il y a, *a priori*, toujours déformation après cémentation ou carbonituration mais, si celle-ci est toujours dans le même sens et avec une amplitude à peu près constante, il est possible de l'anticiper dans la gamme de fabrication antérieure au traitement thermique.

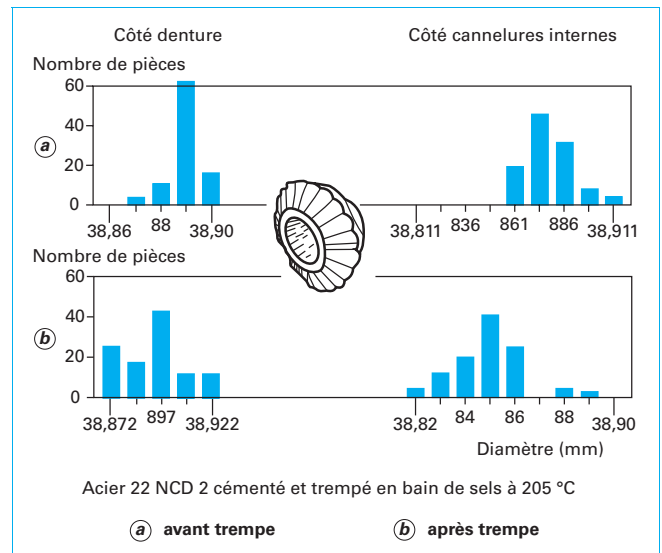


Figure 20 - Variations dimensionnelles de pignons de différentiel après cémentation et trempe en bain de sels

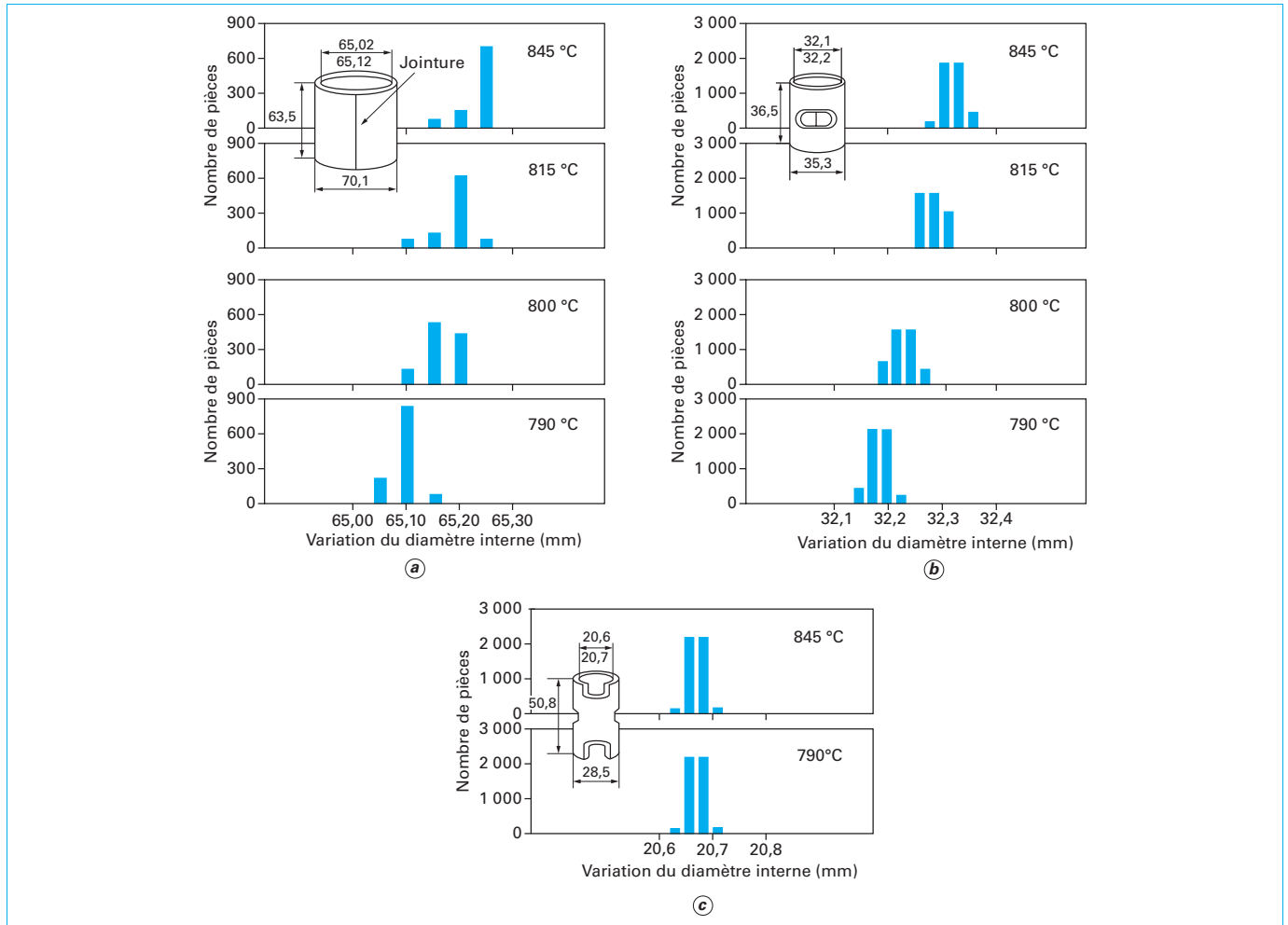


Figure 21 – Influence de la température de carbonituration sur les variations dimensionnelles de différents types de pièces

Les techniques de minimisation des déformations sont rares et empiriques. On peut cependant mentionner :

- la géométrie de la pièce (éviter les angles vifs, les juxtapositions de grosses sections avec des petites, favoriser la symétrie du champ thermique, etc.) ;
- le cahier des charges matière, permettant de maîtriser au mieux la microstructure et en particulier l'éventuelle structure en bandes initiale ;
- les traitements thermiques interopérations : détensionnement, stabilisation entre opérations d'usinage sévères ;
- le positionnement des pièces dans les charges, pour rendre aussi homogènes que possible la couche enrichie et le champ thermique durant la trempe ;
- la loi de montée en température, la plus lente possible de manière à minimiser les distorsions au chauffage ;
- le maintien des pièces durant la phase d'enrichissement, de manière à éviter les déformations par fluage ;
- la température d'austénitisation, la plus basse possible eu égard aux exigences de structure, de caractéristiques mécaniques et de rentabilité ;
- la gestion du pouvoir cémentant ou carbonitrurant du milieu de traitement ;
- la gestion de la trempe : température du fluide de trempe aussi élevée que possible, agitation permettant d'assurer l'homogénéité du champ thermique ;

- éventuellement la trempe sous presse, afin de minimiser les distorsions en bénéficiant du bridage des pièces au moment de la transformation martensitique ;
- le choix d'un acier de meilleure trempabilité permettant de réduire la sévérité de trempe de l'installation.

En raison de la très faible ductilité des couches cémentées ou carbonitrurées, il est préférable – dans la mesure du possible – d'éviter un redressage.

### 6.3 Influence des défauts détectés lors du process

Les éléments de l'installation sur lesquels peuvent être décelées des dysfonctionnements sont :

- la **préparation** : par lavage, nettoyage mécanique, pré-oxydation, sans oublier le masquage, ou encore le positionnement des pièces,... ;
- le **four** avec ses moyens de chauffage et de pyrométrie, ses qualités d'étanchéité aux entrées d'air et apports d'eau, ses moyens de brassage d'atmosphère,... ;
- l'**atmosphère** : débit/volume (taux de renouvellement), composition contrôlée par les capteurs d'analyse, régulation par l'algorithme de pilotage,... ;

– le **bac de trempe** : qualité du fluide, température, agitation, introduction éventuelle de polluants (eau dans l'huile), propreté et degré de décomposition du fluide.

### 6.3.1 Préparation

La surface doit être réceptive et offrir une résistance aux réactions de transfert minimum et « régulière ». Toute pollution chimique peut être une barrière aux transferts et source de points doux par irrégularités de diffusion ou absence totale de diffusion. Les solutions de lessivage alcalin ou acide, nettoyage mécanique type grenailage angulaire ou corindonage, l'activation par préchauffage en présence d'air entre 450 et 650 °C ont été évoquées au § 6.

**Rappelons** que la présence d'oxydes préalables peut entraîner la formation de pellicules détachables après traitement.

La constitution de la charge, ou encore le positionnement des pièces dans les paniers, sont souvent à l'origine d'hétérogénéités de déformation, et ou de dureté. Cela peut être dû à la masse embarquée, mais aussi au bridage des pièces dans le montage.

Les étapes de protection du type épargne peuvent être mal réalisées et induire des défauts d'enrichissement ou des dégradations rapides des éléments réfractaires lors de la volatilisation de ces peintures de masquage, souvent associées à l'introduction dans le four de produits lessiviels.

L'introduction de polluants peut également amener l'apparition de composés à bas points de fusion, principalement au niveau des réfractaires riches en nickel et entraîner des brûlures localisées.

### 6.3.2 Four

#### ■ Montée en température et maîtrise des paramètres de maintien

Lors de la montée en température, on peut travailler sous des atmosphères oxydantes, voire nitrurantes si l'on injecte l'ammoniac trop rapidement.

Dans le premier cas, il sera possible d'observer sur les pièces traitées de la calamine, de la décarburation pouvant induire des tapures au cours de la trempe, une oxydation interne,...

Dans le second cas, on favorisera l'apparition de la porosité en sous couche.

En fonction également de la variation de la massivité des pièces, il est possible de mesurer des gradients thermiques très importants en l'absence de palier d'homogénéisation au cours de la montée en température. Ce phénomène a de multiples conséquences : des déformations mal maîtrisées et des tapures de chauffe.

Le contrôle fréquentiel de la chaîne de mesure, de la cartographie des températures dans l'enceinte, et des paramètres de chauffe et de temps de maintien devrait permettre d'éviter l'ensemble des problèmes liés au grossissement de grains, surdiffusion, brûlures, défaut d'austénitisation,...

#### ■ Distribution des gaz et brassage de l'atmosphère

L'homogénéité et la reproductibilité seront d'autant meilleurs que le four se rapprochera d'un réacteur parfait, sans court-circuit ni points morts, d'où l'importance du brassage en regard de la forme de la chambre du four et de la (ou des) zone(s) d'introduction des gaz. Ces dernières doivent également être réalisées dans des zones favorables au craquage dans le cas des atmosphères préparées à partir de liquides organiques. Le four doit être exempt de zones froides, sources de dépôts de suie. Les procédures de brûlage des suies doivent être respectées.

#### ■ Principales défaillances du four à surveiller

On peut citer les paramètres repris dans le tableau 10 :

– **prise d'air** : manques d'étanchéité du four le plus souvent au niveau des portes, des vérins pneumatiques, des passages des systèmes d'avances mécaniques (chaînes), des filtres à huile via le bac de trempe ;

**Tableau 10 – Principaux éléments de surveillance du four**

Anomalies de fonctionnement	Paramètres incriminables	Actions correctives
Apport d'air	Étanchéité des portes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualité des joints, graissage</li> <li>• Planéité des plans de joint</li> </ul>
	Étanchéités des vérins pneumatiques, des passages d'organes de commande, des filtres	Maintenance et contrôle
Apport d'eau	Fuites par manque d'étanchéité, par corrosion	Maintenance, contrôle, remplacement par des fluides non aqueux
Température faible	Défaillance des éléments chauffants	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Étalonnage</li> </ul>
	Pyrométrie, chaîne de mesure, erreur de programmation,	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintenance</li> </ul>
Température forte	Pyrométrie, chaîne de mesure, erreur de programmation.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Étalonnage</li> <li>• Maintenance</li> </ul>
	Réaction exothermique	Surveiller les entrées d'air sur four saturé en suie.

– **apport d'eau**, notamment par le système de refroidissement des turbines ;

– **température faible** par défaut de consigne, de pyrométrie, de panne sur les éléments chauffants (coupure de résistance(s), arrêt de brûleur(s) ;

– **température forte**, spécialement une montée anormale de la température qui peut être due à une défaillance de la pyrométrie mais surtout par suite d'une réaction exothermique liée à la présence de suie dans le four ou sur les montages réagissant avec l'oxygène provoquant un dépassement de la consigne. Il faut alors veiller à respecter les procédures de brûlage des suies et vérifier les apports de gaz d'enrichissement ;

– **dégradation des éléments chauffants et des supports réfractaires** liée à un brûlage de suie dans des zones de fortes accumulations de suie.

### 6.3.3 Atmosphère

Les paramètres de suivi de l'atmosphère sont ceux qui déterminent sa composition, suivie par la mesure des taux de :

- CO, CO<sub>2</sub> mesurés par analyse infra-rouge ;
- O<sub>2</sub> mesuré par sonde thermo-réactive ;
- H<sub>2</sub>O mesurée par le point de rosée ;
- voire le suivi du CH<sub>4</sub> également par analyseur IR.

Les écarts de mesure peuvent être liés à des :

- défaillances des analyseurs ou circuits de prélèvement ;
- défaillances de la débitmétrie ;
- défaillances de la régulation d'atmosphère ;
- présences de suie dans le four qui modifie les équilibres et également sur la qualité et les fréquences de brûlage de suie mis en place ;
- inhomogénéités thermiques dans l'enceinte du four ;
- brassages de l'atmosphère insuffisant ou inhomogène ;

– apports de polluants externes, tels que des résidus d’huile de coupe, de produits lessiviels, voir de l’eau apportés par une opération lavage-rinçage-séchage non optimisée.

Ces différents facteurs vont jouer sur :

- la valeur du potentiel carbone ;
- les résultats de l’enrichissement ;
- les défauts métallurgiques superficiels ;
- la maintenance du four.

**6.3.3.1 Qualité de l’atmosphère**

Elle dépend, en premier lieu, de sa préparation obtenue, soit à partir d’un générateur endothermique (tableau 11) soit par un mélange dans le four d’azote et méthanol (tableau 12), d’un hydrocarbure et d’air, de mélanges d’alcool et d’eau.

Ne seront abordés ici que les atmosphères de générateur et de mélange azote méthanol.

**6.3.3.2 Composition dans le four**

**% CO insuffisant**

Se reporter à tableau 13.

**• Cas d’une production par un générateur endothermique**

Le fonctionnement du générateur dépend de la température, du rapport air-gaz et de l’efficacité du catalyseur. Le bon fonctionnement de celui-ci nécessite de vérifier ces paramètres.

La qualité du gaz sortant du générateur doit faire l’objet d’une analyse par mesure :

- du point de rosée (« dew-checker ») ;
- de la teneur en CO<sub>2</sub> (analyseur IR) ;
- de la teneur en O<sub>2</sub> par sonde (sonde lambda).

Il est également nécessaire de vérifier la qualité de la « trempe » du gaz en sortie du générateur et l’absence d’entrée d’air sur les circuits entre le générateur et le four.

Tableau 11 – Défauts de préparation d’atmosphère produite par un générateur endothermique		
Origines	Paramètres incriminables	Défauts résultants
Dysfonctionnement du générateur	Température	Composition du gaz non-conforme
	Mélange ou rapport air gaz	Composition du gaz non-conforme
	Catalyseur défaillant	Mauvais craquage du gaz, encrassement
	Moyen de contrôle	Régime de marche modifié
	Conditions de trempe du gaz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Défauts de débit dans le four</li> <li>• Augmentation du taux de CO, dépôts de suie</li> </ul>
	Canalisations encrassées	Modification de l’atmosphère (composition, débits)
	Prises d’air	Risques d’explosion, baisse du taux de CO

**• Cas d’une atmosphère azote-méthanol**

Les composants résultant du craquage d’une atmosphère obtenue par un mélange azote-méthanol sont en relation avec les débits de méthanol et d’azote.

Il convient de vérifier la valeur et la stabilité des débits (efficacité du dégazage), le bon état de fonctionnement de la canne d’injection.

**Quels que soient les modes de production de l’atmosphère, l’apport de gaz d’enrichissement (méthane ou propane) a un rôle important.**  
 S’il est insuffisant, le potentiel carbone ne sera pas obtenu. S’il est trop important, il peut y avoir un effet de dilution qui fait baisser le taux de CO amenant une demande d’enrichissement, alors que l’atmosphère est potentiellement trop riche. Il en résultera des dépôts de suie.

Les vannes d’apport du gaz d’enrichissement, ainsi que les débits, doivent être contrôlés. Il est important de vérifier l’absence d’entrée d’air sur les circuits entre le débitmètre et le four.

Tableau 12 – Défauts de préparation d’atmosphère produite par un mélange azote méthanol		
Origines	Paramètres incriminables	Défauts résultants
Impuretés dans le méthanol	Livraison	Suies, défauts de surface, réactions perturbées
	Pollution de la cuve	
Pression et débit de méthanol	Fonctionnement de la pompe	Débits irréguliers
	Pression d’azote dans la cuve	Instabilité des débits
	Système de dégazage et purge	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instabilité des débits</li> <li>• Composition mal maîtrisée</li> </ul>
	Clapets anti-retour sur le circuit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrées de gaz dans la canalisation</li> <li>• Défaut de débit</li> </ul>
Mauvais débit des gaz	Étalonnage des débitmètres	Débits incorrects : composition du gaz incorrecte
	Erreur de lecture sur rotamètres	
	Mauvais choix de débitmètre	
Canne d’injection	Embout endommagé	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauvais craquage</li> <li>• Endommagement du four possible</li> </ul>
	Placement dans le four	Mauvais craquage si placement en zone froide, production de suies
Circuit d’amenée des fluides	Entrées d’air	Écarts de composition, CO faible

Parmi les facteurs principaux de défaillance, on peut recenser (tableau 13) :

- défaillance de l'analyseur IR : vérifier l'étalonnage ;
- volume total de gaz insuffisant : obtenir le taux de renouvellement correct par rapport au volume du four et/ou à la surface réactive de la charge ;
- entrée d'air accidentelle : fuite sur la carcasse du four étanchéité des portes, sur les vérins pneumatiques, sur les filtres de l'huile de trempe ;
- entrée d'eau accidentelle, par suite d'une fuite sur les systèmes refroidis par eau, sur les échangeurs de chaleur sur la boîte à eau des turbines.

**Un % CO insuffisant est un paramètre critique à identifier impérativement.** Les conséquences sont :

- la non obtention du potentiel carbone et, par conséquent, une concentration en carbone en surface des pièces

**Tableau 13 – Influence d'une teneur en CO insuffisante dans l'atmosphère**

Origines	Paramètres incriminables	Actions correctives
Préparation du gaz	Dysfonctionnement du générateur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• paramètres de fonctionnement du générateur</li> <li>• Circuit de transport du gaz</li> </ul>
	Anomalies du mélange azote méthanol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualité des entrants</li> <li>• Qualité des circuits d'amenée des fluides</li> <li>• Débitmétrie</li> </ul>
Canne d'injection des fluides	Conception, état et situation de la canne d'injection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choix d'un placement en partie chaude et pulvérisation immédiate</li> <li>• Maintenance de la canne</li> </ul>
Four	Entrée d'air	Étanchéité de tous les contacts possibles avec l'air
	Entrée d'eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surveillance des circuits de refroidissement par eau</li> <li>• Remplacement de l'eau par d'autres fluides caloporteurs</li> </ul>
Surveillance et pilotage de l'atmosphère	Défaillance des analyseurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Étalonnage</li> <li>• Gaz étalon</li> <li>• Contrôle des circuits de prélèvement des gaz (analyse IR)</li> </ul>
	Défaillance du pilotage	• Contrôle des systèmes de régulation

insuffisantes et une dureté inférieure à la valeur demandée : pièces mauvaises ;

- la non-obtention de la profondeur de traitement : pièces mauvaises ;
- l'appel de gaz d'enrichissement trop important est une source possible de suies ;
- l'apport d'air entraîne des oxydations superficielles ajoutées aux autres conséquences ;
- l'apport d'eau peut, en plus de la baisse du taux de CO, conduire à un transfert d'eau vers le bac de trempe **avec des risques d'incendie.**

■ **Éléments oxydants trop élevés : % CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>O**

• **Si l'atmosphère est oxydante** le potentiel carbone ne peut pas être obtenu (tableau 14).

• **Si le % CO est faible**, il y a lieu de reprendre tous les points relatifs à cette anomalie.

• **Si le % CO est correct**, il peut s'agir d'une :

- insuffisance de gaz d'enrichissement (méthane ou propane) ;
- légère fuite d'air ou d'eau ;
- anomalie sur la température ;
- défaillance de l'analyseur de CO<sub>2</sub> (IR) (vérifier les étalonnages) ou O<sub>2</sub> (sonde à oxygène) (état de la sonde).

**Tableau 14 – % CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>O trop élevés – CO correct**

Origines	Paramètres	Actions
Insuffisance de gaz d'enrichissement	Étalonnage des débitmètres	Étalonnage et lecture
	Erreur de lecture sur rotamètres	Préciser la méthode de lecture
	Mauvais choix de débitmètre	Adapter le débitmètre au fluide dosé
Légère fuite d'air ou d'eau	Fuite d'eau boîte à eau turbine, échangeurs, pousseuses	Maintenance
Défaillance analyseur CO <sub>2</sub>	Circuit de prélèvement des gaz	Maintenance et surveillance du circuit : • Refroidissement • Filtres
	Analyseur	• Étalonnage • Gaz étalon
Défaillance de la sonde O <sub>2</sub>	Encrassement par la suie	Fréquence et débit de l'air de nettoyage
	Vieillessement de la zircone	Maintenance et étalonnage
	Mesure de la température	• Étalonnage • Correction de l'écart de mesure entre sonde et four
Anomalie sur la température	Pyrométrie .....	Contrôle et étalonnage
	Chaîne de mesure	



Origines	Paramètres	Actions
Excès de gaz d'enrichissement (méthane ou propane)	Étalonnage des débitmètres	Étalonnage et lecture
	Erreur de lecture sur rotamètres	Préciser la méthode de lecture
	Mauvais choix de débitmètre	Adapter le débitmètre au fluide dosé
Anomalies sur la température	Pyrométrie Chaîne de mesure	Contrôle et étalonnage
Défaillance de l'analyseur de CO <sub>2</sub>	Circuit de prélèvement des gaz	Maintenance et surveillance du circuit : • Refroidissement  • Filtres
	Analyseur	• Étalonnage  • Gaz étalon
Défaillance de la sonde O <sub>2</sub>	Encrassement par la suie	Fréquence et débit de l'air de nettoyage
	Vieillessement de la zircone	Maintenance et étalonnage  • Étalonnage
	Mesure de la température	• Correction de l'écart de mesure entre sonde et four

• **Conséquences sur les pièces :**

- profondeur enrichie insuffisante ;
  - teneur en carbone superficielle insuffisante (dureté faible).
- Autres défauts associés : défauts de structure, tel que l'oxydation superficielle.

■ **% CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>O insuffisants**

Si le %CO est correct, l'atmosphère est trop carburante (tableau 15), il peut s'agir :

- d'un excès de gaz d'enrichissement (méthane ou propane) ;
- d'une anomalie sur la température ;
- d'une défaillance de l'analyseur de CO<sub>2</sub> (IR) (vérifier les étalonnages) ou O<sub>2</sub> (sonde à oxygène) (état de la sonde).

6.3.3.3 **Production anormale de suie**

L'origine la plus probable est un excès de gaz d'enrichissement (méthane ou propane) pouvant provenir (tableau 16) :

- d'une anomalie sur les débits (vérifier les débitmètres) ;
- d'appels anormaux du gaz d'enrichissement si CO insuffisant ;
- d'une défaillance du système de régulation et pilotage (circuit de débitmétrie, analyseurs des gaz) ;
- d'une injection du gaz en partie froide qui conduit à un mauvais craquage du méthane ou propane ;
- de l'influence de dépôts de suie préalables ayant un effet catalytique ;
- de la présence de zone(s) froide(s) dans le four liée(s), par exemple, à des pannes d'éléments chauffants ;
- d'un brûlage de suie non optimisé.

Origines	Paramètres	Actions
Anomalie sur les débits	Étalonnage des débitmètres	Étalonnage et lecture
	Erreur de lecture sur rotamètres	Préciser la méthode de lecture
	Mauvais choix de débitmètre	Adapter le débitmètre au fluide dosé
Appels anormaux du gaz d'enrichissement	Dilution de l'atmosphère par le gaz d'enrichissement	L'introduction du gaz d'enrichissement ne doit pas provoquer d'évolution du %CO.  Réduire les débits instantanés
Introduction du gaz à température trop basse	Consigne de commande de l'apport de gaz	Adapter la température au gaz introduit (méthane ou propane)
Défaillance du système de régulation et pilotage	Algorithme Processeur	
Injection du gaz en partie froide	Four	Modifier
Dépôts de suie préalables	Four	• Réglages préalables  • Procédure de brûlage des suies
Présence de zone(s) froide(s)	Fours et montages	• Vérifier éléments chauffants  • Temps de montée en T° des montages par rapport aux pièces

6.3.3.4 **Débit et conditions d'apport de NH<sub>3</sub> mal maîtrisés**

Le gradient d'azote dans la couche carbonitrurée est en relation avec les conditions d'apport d'ammoniac dans l'atmosphère de carbonituration.

**Deux paramètres sont essentiels :**

- le **débit de gaz ammoniac**, introduit dans de bonnes conditions ;
  - la **température du palier d'introduction du gaz**.
- Un gradient d'azote correct dépend de la réunion des conditions listées au tableau 17.

■ **Gradient d'azote insuffisant sur les pièces**

Si le débit est conforme aux consignes, l'ammoniac est sans doute décomposé en azote et hydrogène moléculaire avant d'arriver sur la charge.

Les paramètres sont :

- la température trop élevée, au-delà de 900 °C l'ammoniac est décomposé dès son entrée dans le four. Le maintien de la fraction non décomposée est d'autant plus grande que la température est basse ;
- le temps d'introduction, l'ammoniac doit être introduit en continu.

**Tableau 17 – Conditions d'obtention d'un gradient d'azote correct en carbonituration**

Origines	Paramètres	Actions
Débits	Débitmétrie	Cf. tableau 4
	Consignes	Réglages : – sur aciers alliés 0,5 à 1,5 % – sur aciers non alliés 2 à 3 %
	Injection de phase liquide	Conception du circuit de soutirage et distribution
Températures	Pyrométrie	Étalonnage et contrôle de la chaîne de mesure
	Consignes	Réglages : – sur aciers alliés : 840 à 900 °C – sur aciers non alliés : 800 à 900 °C

#### ■ Gradient d'azote trop élevé sur les pièces

Le débit d'ammoniac est trop important dans les conditions de température et par rapport au volume total des gaz.

#### 6.3.4 Bac de trempe

Les principaux problèmes que l'on peut rencontrer au niveau du bac de trempe (tableau 18) sont des défauts liés à :

- la température du fluide de trempe inférieure à la consigne ;
- la température du fluide de trempe supérieure à la consigne ;
- des perturbations au niveau de l'agitation ;
- un apport d'eau dans l'huile ;
- la variation de la drasticité du fluide liée à la dégradation de l'état du produit de trempe par craquage ou oxydation des chaînes poly-carbonées ;
- la filtration de l'huile insuffisante ;
- un dysfonctionnement du système mécanique acheminant les charges dans le bac de trempe.

**Tableau 18 – Principaux éléments de surveillance du bac de trempe**

Origines	Paramètres incriminables	Actions correctives
Température du fluide de trempe supérieure à la consigne	Résistance de chauffage	Maintenance
	Régulation (pyrométrie)	Contrôle, étalonnage
	Consigne	Vérification
Défaut d'agitation	Moteur de turbine, turbine	Maintenance
Apport d'eau dans l'huile	Échangeur refroidi par eau	• Maintenance • Remplacement par fluide non aqueux
	Qualité de l'huile	Contrôle de l'huile
Défaut de drasticité du fluide	Qualité de livraison	Contrôle réception
	Pollution	Surveillance
	Vieillessement	Contrôle périodique
Filtration de l'huile insuffisante	Choix du filtre	
	Colmatage	Maintenance

L'ensemble de ces paramètres doit être étroitement suivi si l'on veut éviter :

- les problèmes de duretés à cœur ou en surface (point doux) ;
- des tapures ;
- des variations de déformations ;
- la décarburation ;
- le pelliculage ;
- la coloration.

# Cémentation par le carbone et carbonituration

## Mise en œuvre des traitements

par **Claude LEROUX**

Ingenieur du Conservatoire national des Arts et Métiers (CNAM)  
Consultant

### Sources bibliographiques

#### Article M 1 225

- [1] CETIM. – *Service Matériaux. – Les aciers et leurs traitements thermiques en construction mécanique.* CETIM (1975).
- [2] TOURNIER (C.) et MERCIER (R.). – *Les atmosphères de traitement thermique de type azote-méthanol.* CETIM-Informations n° 75.
- [3] CHATTERJEE (R.), FISCHER (A.) et SCHAABER (O.). – *Quelques considérations sur la carbonituration en atmosphère gazeuse.* *Trait. Therm.*, n° 81/82 (1974).
- [4] MOULIN (L.). – *La surveillance des atmosphères à potentiel carbone contrôlé.* *Aciers Spéciaux*, n° 3 (1967).
- [5] DAWES (R.) et SMITH (C.G.). – *A practical study of the carbonitriding process.* *Heat Treatment of Metals*, 1 (1978).
- [6] POURPRIX (Y.) et NAUDOT (J.). – *Cémentation sous pression réduite.* *Trait. Therm.*, n° 1978 (1985).
- [7] *Metals Handbook. Vol. 4, Heat Treating.* ASM International (1991).
- [8] PEYRE (J.P.) et TOURNIER (C.). – *Choix des traitements thermiques superficiels.* RPM – CETIM Senlis (1985).
- [9] KOISTINEN (D.P.). – *The distribution of residual stresses in carburized parts and their origin.* *Trans. ASM*, vol. 5 (1958).
- [10] LACOUDE (A.) et TRICOT (R.). – *Déformations par traitement thermique des aciers de cémentation.* *Rev. de Métall.* (janv. 1972).
- [11] TOURNIER (C.), BRUCELLE (A.) et LECROISEY (F.). – *Influence des conditions de cémentation sur la présence d'austénite résiduelle.* *Étude CETIM*, n° 12G080 (1979).
- [12] MURRY (G.) et SAUZAY. – *Stabilité dimensionnelle d'aciers de cémentation et d'aciers à outils pour travail à chaud.* Document IR-SID, p. 203 (mai 1973).

- [13] CONSTANT (A.), HENRY (G.) et CHARBONNIER (J.C.). – *Principes de base des traitements thermiques, thermomécaniques et thermochimiques des aciers.* PYC Édition (1992).

#### Article M 1 226v2

- [14] NEUMAN (F.) et PERSON (B.). – *Beitrag zur Metallurgie des Gasaufkohlung.* *Härterei Technische Mitteilungen*, 23, Heft 4 (1968).
- [15] GUNNARSON (G.). – *Einfluss von Ligierungstoffen auf den Kohlenstoffgehalt von aufgekohlten Einsatzstählen.* *Härterei Technische Mitteilungen*, 22 (1967).
- [16] MOULIN (L.), TRICOT (R.) et CASTRO (R.). – *Influence de l'atmosphère et des éléments d'alliage sur la carburation superficielle par cémentation gazeuse.* *Rev. de Métall.* (nov. 1968).
- [17] GERGELY, RETI, KONKOLY et SOMOGYI. – *Aide au choix d'acier par calcul des caractéristiques mécaniques.* *Trait. Therm.*, n° 256, 257-261 (1992-1993).
- [18] LEBRETON (C.) et TOURNIER (C.). – *CETIM-SICLOP : un nouvel outil logiciel pour le traitement thermique.* *Trait. Therm.*, n° 208 (1987).
- [19] ANDREWS. – *Empirical formulae for the calculation of some transformation temperatures.* *JISI* (juil. 1965).
- [20] HAYNES. – *Interrelation of isothermal and continuous cooling heat treatment of low alloy steels and their practical significance.* *Heat Treatment of Metals, Special report 951323, JISI* (1986).
- [21] LESAGE (J.). – *Influence de l'azote sur la température d'apparition de la martensite.* *Trait. Therm.* n° 259 (1992).
- [22] LE STRAT (F.) et LAMOTHE (M.). – *Oxydation interne et troostite après traitement thermique.* *ATTT 92 Internationaux de France du Traitement Thermique, Strasbourg 92.* PYC Édition (1992).

- [23] Association Technique de Traitement Thermique (ATTT). – *Le traitement thermique des aciers sous atmosphère.* PYC Édition, Paris (1980).

- [24] WYSS (U.) et WEISSOHN (K.H.). – *Profil des teneurs en carbone et des duretés dans les couches cémentées.* *ATTT 90 Internationaux de France du Traitement Thermique Le Mans 90* PYC Édition (1990).

- [25] ROSE et HOUGARDY. – *Atlas zur Wärmebehandlung des Stahles, Max Planck Institut für Eisenforschung. Verlag Stahleisen MBH, Düsseldorf* (1972).

- [26] MURRY (G.). – *Méthode quantitative d'appréciation des aciers.* Exemples d'application. *13<sup>e</sup> Journée des Aciers Spéciaux, Saint-Étienne, Éd. OTUA* (16-17 mai 1974).

- [27] MURRY (G.) et TOURNIER (C.). – *Calcul des courbes Jominy cémentées (à paraître).*

- [28] *Document Acier Boehler.*

- [29] *Metals Handbook. Vol. 4, Heat Treating.* ASM International (1981).

#### Autres ouvrages

MONGIS (J.), TOURNIER (C.) et LECROISEY (F.). – *Les mécanismes généraux de durcissement des aciers.* *CETIM-Informations* n° 99 (fév. 1987).

BARRALIS (J.) et MAEDER (G.). – *Précis de Métallurgie.* AFNOR-Nathan, Paris (1990).

GHIGLIONE (D.), CONVERT (F.) et TOURNIER (C.). – *Obtention des propriétés d'emploi des pièces cémentées par la maîtrise du profil carbone.* *CETIM-Informations* n° 83 et 84 (1983) et (1984).

DELEON et BARON (M.). – *Anomalies de carbonituration dans les aciers de décolletage.* *Trait. Therm.*, n° 157 (1981).

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

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

LHOTE (B.), CANTACUZENE (S.), COPPIN (P.) et BUFFIN (M.). – *Atmosphère de traitement thermique.* [M 1 220] (2000).

MURRY (G.). – *Aciers de construction mécanique pour traitements thermiques.* [M 315] (1992).

### À lire également dans nos bases

## Normes et standards

### Association Française de Normalisation (AFNOR)

#### Normes sidérurgiques

A 33-111	10.87	Aciers à dispersoïdes destinés au forgeage à chaud. Demi-produits et barres.
NF A 35-551	7.86	Aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour cémentation. Nuances. Demi-produits, barres et fils machine.
NF EN 10083-1	7.91	Aciers pour tempe et revenu. Partie 1 : conditions techniques de livraison des aciers spéciaux (indice de classement A 35-552-1).
NF EN 10083-2	7.91	– Partie 2 : conditions techniques de livraison des aciers de qualité non allis (indice de classement A 35-552).
NF EN 10084	06.08	Aciers pour cémentation – Conditions techniques de livraison.
NF EN 10088-1	11.95	Aciers inoxydables. Partie 1 : Liste des aciers inoxydables. Indice de classement 36-000-1.
NF EN 10088-2	11.95	Aciers inoxydables. Partie 2 : Conditions techniques de livraison des tôles et bandes pour usage général. Indice de classement 36-000-2.
NF EN 10083-3	11.95	Aciers inoxydables. Partie 3 : Conditions techniques de livraison des demi-produits, les barres, le fil machine et les profils pour usage général.

#### Normes de contrôle

##### • Dureté

NF A 03-152	12.08	Produits sidérurgiques. Essai de dureté Brinell de l'acier.
NF A 03-153	10.86	Produits métalliques. Essai de dureté Rockwell (échelles A-B-C-D-E-F-G-H-K).
NF EN 10109-1	12.94	Matériaux métalliques. Essai de dureté. Partie 1 : Essai Rockwell (échelle A, B, C, D, E, F, G, H, K) et Essai superficiel. Indice de classement A 03-021.
NF A 03-154	3.83	Produits sidérurgiques. Essai de dureté Vickers de l'acier (HV5 à HV100).
NF A 03-163	12.83	Produits sidérurgiques. Essai de dureté Vickers sous charge réduite de l'acier (HV0,2 à HV5 exclu).

##### • Métallographie

NF A 04-102	12.80	Produits sidérurgiques. Détermination de la grosseur du grain ferritique ou austénitique des aciers.
NF A 04-201	12.84	Produits en acier. Aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour traitement thermique. Détermination de la profondeur de décarburation.
NF A 04-204	12.85	Produits acier. Détermination de l'épaisseur totale ou conventionnelle des couches minces durcies superficielles.
NF A 05-150	12.85	Produits en acier. Techniques d'examen micrographique.
NF A 05-151	09.84	Produits en acier. Examen macrographique par impression aux sels d'argent et l'acide sulfurique. Méthode dite « de baumann » ou empreinte au soufre.

##### • Norme de nitruration

NF A 02-051	12.94	Traitements de nitruration et nitrocarburation de pièces mécaniques et outillages en acier.
-------------	-------	---

#### Spécifications

##### PSA

B 15-2210	03.81	Traitements thermiques. Cémentation.
B 15-2220	03.81	Traitements thermiques. Carbonituration ou cyanuration.

##### Peugeot-Citroën-Talbot

315-2240	02.85	Nitruration.
----------	-------	--------------

#### Renault

02-60-20...A	04.89	Carbonituration.
02-60-202...A	06.90	Cémentation.
02-60-206	01.93	Nitruration des aciers.

#### Synecot-CETIM

CTR2	10.87	Spécification technique pour la cémentation, suivie de durcissement par trempe et revenu des dentures d'engrenages.
CBR2	10.87	Spécification technique pour la carbonituration des dentures d'engrenages.
DN1	12.88	Spécification technique pour la nitruration et les nitrocarburations des dentures d'engrenages.

#### Aéronautique

FF Aéro 90130	8.84	Traitements thermochimiques des alliages métalliques utilisés en construction aérospatiale. Généralités.
FF Aéro 90131	8.84	Traitements thermochimiques des alliages métalliques utilisés en construction aérospatiale. Cémentation des aciers par le carbone.
FF Aéro 90132	8.94	Traitements thermochimiques des alliages métalliques utilisés en construction aérospatiale. Cémentation des aciers par l'azote (nitruration).

#### Aérospatiale

MP 613111	12.89	Nitruration gazeuse des aciers de construction.
-----------	-------	---

#### SNECMA

DMP 32012	12-76	Traitements thermochimiques. Nitruration.
DMP 32018	3-83	Traitements thermochimiques. Nitruration ionique.

#### Deutsches Institut für Normung (DIN)

DIN 5773 Teil 5 5.77	Heat-treatment of ferrous metals ; heat-treated part ; representation and indications in drawings ; nitriding.
DIN 17022 Teil 3 4.89	Heat-treatment of ferrous materials ; heat treatment methods ; case hardening.
DIN 17211	4.87 Nitriding steels ; technical delivery conditions.
DIN 50190 Teil 3 3.79	Hardness depth of heat-treated parts ; determination of the effective depth of hardening after nitriding.

#### Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI)

UNI 5381-70	Trattamenti termici dei materiali ferrosi. Carboceementazione. Traitements thermiques des matériaux ferreux. Cémentation par le carbone.
UNI 5478-74	Cementazioni metalliche. Nitrurazione salina aerata. Cémentations métalliques. Nitruration en bains de sels aérés.
UNI 5479-70	Trattamenti termici dei materiali ferrosi. Carbonitrazione. Traitements thermiques des matériaux ferreux. Carbonituration.
UNI 7358-70	Trattamenti termici dei materiali ferrosi. Nitrurazione. Traitements thermiques des matériaux ferreux. Nitruration.

#### Japanese Industrial Standards (JIS)

JIS B 6914-83	Carburizing, quenching and tempering of steel. Cémentation, durcissement par trempe et revenu de l'acier.
JIS B 6915-85	Nitriding of steel. Nitruration de l'acier.

#### American Microscopical Society (AMS)

AMS 2753A	1.85	Liquid salt bath nitriding, non cyanide bath.
AMS 2755C	4.83	Liquid salt bath nitriding.
AMS 2756	4.85	Gaz nitriding of steel parts.
AMS 2762	84	Cémentation des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés.

## Annuaire

### Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs (liste non exhaustive)

#### ■ Gaz Industriels

L'AIR LIQUIDE  
<http://www.airliquide.com>  
 AIR PRODUCTS. PRODAIR  
<http://www.airproducts.fr>  
 LINDE  
<http://www.linde-gas.fr>  
 MESSER  
<http://www.messer.fr>  
 UNION CARBIDE  
<http://www.ucarbide.com>

#### ■ Liquides organiques

BRENNTAG  
<http://www.brenntag.fr>  
 UNIVAR  
<http://www.univar.fr>

#### ■ Bains de sels

HEF DURFERRIT  
<http://www.hef.fr>  
 PETROFER  
<http://www.petrofer.fr>

#### ■ Analyseurs d'atmosphère

HARTMANN & BRAUN (FRANCE)  
<http://www.abb.com>  
 SIEMENS  
<http://www.siemens.fr>  
 PROCESS ELECTRONIC  
<http://www.process-electronic.com>

#### ■ Procédés de traitements fours réacteurs et contrôle du procédé

AICHELIN  
<http://www.aichelin.com>  
 ALD  
<http://www.ald-vt.com>

AFC-HOLCROFT  
<http://www.afc-holcroft.com>  
 BMI  
<http://www.bmi-fours.com>  
 CODERE  
<http://www.condere.ch>  
 CIEFFE  
<http://www.cieffe-forni.com>  
 ECM TECHNOLOGIES  
<http://www.ecmtech.com>  
 IPSEN  
<http://www.ipsen.de>  
 NITREX METAL  
<http://www.nitrex.com>  
 PLASMA METAL  
<http://www.plasma-metal.lu>  
 RÜBIG  
<http://www.rubig.com>  
 SAFED  
<http://www.safed.ch>  
 SCR CREVOISERAT  
<http://www.scr-sa.ch>  
 SERTHEL  
<http://www.serthel.com>  
 THERMIC SERVICE  
<http://www.thermic-service.com>

#### ■ Prestations de services

BODYCOTE  
<http://www.bodycote.com>  
 HEF TECHNIQUES SURFACES  
<http://www.hef.fr>  
 METATHERM- AIM  
<http://www.metatherm.fr>  
 THERMI-LYON  
<http://www.thermi-lyon.com>