

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Science de l'ingénierie

Département : Métallurgie et génie de matériau

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Métallurgie

Spécialité : Génie Métallurgique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Influence des traitements thermiques sur les propriétés
mécaniques d'un acier cémenté**

Présenté par : *TADJER Mohamed el Mokhtar*

Encadrant : *BOUZID Kheireddine* Dr Université Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance :

KHETTACHE Abdelkader	Pr	UBM Annaba	Président
BOUZID Kheireddine	Dr	UBM Annaba	Encadrant
HADJI Alli	Pr	UBM Annaba	Examineur
MEBAREK Abdelmalek	Pr	UBM Annaba	Deuxième examinateur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Je tiens à exprimer ma grande reconnaissance et mes sincères remerciements pour mon encadreur Dr. BOUZID kheireddine du Département de Métallurgie de l'Université Badji Mokhtar, d'Annaba, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

J'adresse également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

Je remercie profondément tous les professeurs de notre cursus et toute l'équipe du département de Métallurgie de l'Université Badji Mokhtar, d'Annaba, pour leurs contributions et leurs précieux conseils.

Je voudrais adresser un remerciement particulier à mes parents, et mes grands-parents pour leur soutien permanent qu'ils m'ont apporté pendant toute ma vie.

Et finalement, un vif remerciement à toute ma famille et mes amies qui n'a jamais arrêté de me soutenir et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je tiens vivement, à dédier ce travail en signe de respect et de reconnaissance :

Aux personnes très chères qui ont partagé mes joies et mes Peines, qui ont été toujours à mes côtés, qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui : ma mère, mon père et ma grand-mère.

A mes frères et mes sœurs

Et à tous mes proches sans exception

Et à tous mes amis et amies

A Tous ceux qui ont contribué à m'aider à la réalisation de ce mémoire.

Sommaire

Introduction générale	1
I. Les traitements thermochimiques	2
I.1. Définition	2
I.2. Les différents traitements thermochimiques	4
I.2.1. Boruration	4
A. Les propriétés des couches de borure :	6
B. Applications :	7
I.2.2. Nituration :	7
A. Microstructure d'une couche nitrurée :	8
B. Avantage de nituration :	9
C. Les propriétés de nituration	9
I.2.3. Nitrocarburation.....	10
A. Processus	10
B. Microstructure d'une couche nitrocarburée.....	11
C. Avantages	13
I.2.4. Carbonitruration.....	13
A. Avantage de Carbonitruration	14
I.2.5. Cémentation.....	14
A. Définition.....	14
B. Principe de la cémentation.....	16
C. Les Procédés de cémentation.....	18
a. Cémentation solide	18
b. Cémentation gazeuse	20
c. Cémentation liquide.....	27
D. Les propriétés des couches cémentées.	30
a. Profondeur de cémentation	30
b. La Dureté de la couche cémentée et la concentration du carbone en surface	31
c. La Dureté du cœur	32
d. Structure.....	33
E. Les aciers de cémentation	33
a. Aciers alliés au chrome.....	34
b. Aciers alliés au chrome-vanadium	34
c. Aciers alliés au chrome-nickel.....	34

d. Aciers alliés au chrome-manganèse	34
II. Les traitements thermiques des aciers cémentés.....	36
II.1. Définition	36
II.2. La trempe	37
II.2.1. Trempe directe.....	38
II.2.2. La trempe sous zéro.....	39
II.2.3. La trempe simple	40
A. La trempe simple sans raffinement de cœur.....	40
B. La trempe simple avec raffinement de cœur.....	41
C. La trempe simple avec recuit intermédiaire.....	42
D. La trempe simple après transformation isotherme	43
II.2.4. Double trempe	43
II.2.5. La trempe isotherme	44
II.3. Le revenu	45
II.4. Les propriétés mécaniques des aciers cémentés après traitement thermique.....	46
II.4.1. L'usure	46
A. Mécanismes d'usure	47
a. Usure par abrasion	47
b. Usure par adhésion	49
c. Usure par érosion	49
d. Usure par fatigue de surface	49
e. Usure par corrosion.....	49
II.4.2. La Fatigue.....	50
III. L'influence des traitements thermiques (trempe) sur la microstructure et la résilience d'un acier cémenté.	53
III.1. Test de résilience mécanique	55
III.2. Les Microstructures	56
IV. Conclusion.....	59
V. Référence :	60

Liste des figures

Figure 1: Structure des couches borurées	6
Figure 2: Couche de boruration sur l'engrenage	7
Figure 3: Micrographie optique de la surface nitrurée de l'acier 33CrMoV12-9	9
Figure 4: Microstructure typique des échantillons ferritiques (a) et austénitiques (b).....	12
Figure 5: Évolution de la dureté en fonction de la teneur en carbone pour divers taux de martensite.	15
Figure 6: Principe de la cémentation	16
Figure 7: Variation de la concentration de carbone avec la distance	17
Figure 8: Phases de cémentation	17
Figure 9: Relation entre la profondeur totale de cémentation et la durée totale de l'opération à température constante après cémentation en caisse.....	20
Figure 10: Cémentation gazeuse	21
Figure 11: Influence du taux de méthanol.....	22
Figure 12: Schéma synthétique des réactions de transfert du carbone en cémentation gazeuse par le méthane.	24
Figure 13: Micrographie par microscopie électronique à balayage d'un acier 20MnCr5 cémenté à pression atmosphérique révélant la présence d'oxydation intergranulaire.....	25
Figure 14: Représentation d'une cémentation liquide	27
Figure 15: Concentrations de carbone et d'azote dans la surface en fonction de la teneur en NaCN lors de la cémentation d'acier au carbone non allié pendant 2 à 5 h à 950 ° C dans un bain de cémentation liquide sous un capot de protection en graphite	28
Figure 16: Concentrations de carbone et d'azote dans la surface en fonction de la température de cémentation lors de la cémentation d'acier au carbone non allié pendant 2 à 5 h dans un bain de NaCN à 50%.....	29
Figure 17: profondeur conventionnelle de cémentation.....	31
Figure 18: la Dureté en fonction de la teneur en carbone de l'acier cémentée. La zone ombrée montre l'effet de diffusion de la teneur en austénite et en alliage retenue de l'acier.....	32
Figure 19: cycle de cémentation pour la trempe directe.....	39
Figure 20: procédé de la trempe sou zéro.....	40
Figure 21: cycle de cémentation pour la trempe simple (avec et sans raffinement de cœur).....	42
Figure 22: Cycle de cémentation pour la trempe simple avec recuit intermédiaire	42
Figure 23: Cycle de cémentation avec transformation isotherme et trempe simple.....	43
Figure 24: Cycle de cémentation pour la double trempe.....	44
Figure 25: Effet du revenu sur la dureté du cœur.....	46
Figure 26: L'importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie.....	47
Figure 27: Mécanisme d'usure abrasive à deux corps et d'usure abrasive à trois corps.	48
Figure 28: Effet de l'oxydation interne sur la limite de fatigue.....	52
Figure 29: a) Cycle A où l'austenite dans la microstructure du cœur ne se décompose pas 860 °C. (b) Cycle B à la température °C 775 la ferrite peut transformer dans le cœur.....	54
Figure 30: Illustration schématique d'éprouvette Mini-Charpy V (DIN 50115).	55
Figure 31: Micrographie optique des échantillons étudiés.....	56
Figure 32: fraction de l'austénite résiduelle présente dans les structures finales obtenue par un logiciel de simulation	57

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des phases du système Fe-N-C à 580-590 °C.....	12
Tableau 2: Relation entre l'épaisseur de la couche à cémenter et la température et durée de cémentation	19
Tableau 3: le méthanol se dissocie en CO et H ₂	22
Tableau 4: Moyen de contrôle du potentiel carbone en cémentation atmosphérique.	25
Tableau 5: la dureté maximale de la surface pour une Concentration de carbone de surface pour certains types d'aciers cémenté.....	32
Tableau 6: les principales nuances d'aciers alliés de cémentation et leurs applications.....	35
Tableau 7: Composition chimique de l'acier étudié.....	53
Tableau 8: Fraction volumique des phases	57
Tableau 9: Energie totale absorbée par les échantillons.	58

Introduction générale

La cémentation est l'un des traitements thermo-chimiques qui trouve leur application dans plusieurs secteurs industriels. Les aciers cémentés qui sont trempés à partir de la température de cémentation vers l'ambiante, acquérir une couche superficielle d'une structure martensitique très dure. Ainsi, Les différentes microstructures développées dans le cœur des aciers qui influent considérablement sur leurs propriétés mécaniques, dépendent des paramètres et les conditions opératoires appliqués durant le traitement de cémentation (cémentation suivie par les étapes d'une trempe à la température ambiante).

Notre travail de mémoire et d'étudier l'effet des différents cycles de traitement thermique sur l'évolution microstructurale du cœur et les propriétés mécaniques résultantes.

Le mémoire est composé de trois chapitres principaux :

Le chapitre I : résume des notions générales sur les traitements thermo-chimiques, la boruration, nitruration, la nitrocarburation, la carbonitruration et la cémentation.

Le chapitre II : présente des détails sur l'influence des traitements thermiques sur les propriétés des aciers cémentés.

Le chapitre III : analyse d'une étude sur l'influence des différents cycles thermiques appliqués après la cémentation, et tirer les conclusions principales.

Chapitre I
Traitements
thermochimiques

I. Les traitements thermochimiques**I.1. Définition**

La saturation de la surface de l'acier avec un certain élément par diffusion de cet élément à partir d'un milieu environnant à haute température est appelée traitement thermochimique. La diffusion dans un solide cristallin est basée sur le fait que les atomes peuvent changer leurs positions d'équilibre dans le réseau cristallin. Chaque température d'un solide correspond à un niveau d'énergie défini associé à ses vibrations thermiques. L'énergie n'est pas répartie uniformément entre les atomes du réseau cristallin. La majorité des atomes ont une énergie moyenne qui correspond à la température de chauffe du solide. D'un autre côté, Il y a toujours un nombre suffisant d'atomes avec plus ou moins d'énergie que la valeur moyenne.

Une théorie développée par le scientifique soviétique Y. I. Frenkel affirme que les atomes possédant un niveau d'énergie suffisamment élevé peuvent quitter leurs positions appliquées aux points du réseau cristallin et sauter aux positions interstitielles. Cela crée des lacunes dans le réseau cristallin qui peuvent être occupés par tout autre atome. À mesure que la température augmente, le nombre d'atomes interstitiels et les lacunes dans le réseau cristallin augmentent, augmentant ainsi la vitesse de diffusion.

Cette brève description du processus de diffusion initial montre que la diffusion ne peut se produire dans les alliages que si la diffusion forme une solution solide avec le métal de matrice. La principale raison de la diffusion dans les solutions solides, et en particulier dans le traitement thermique chimique, est la tendance à homogénéiser la concentration dans tout le métal. La vitesse de diffusion des atomes entrants dans le réseau cristallin de fer variera en fonction du type de solution solide qui se forme. Lorsque le fer est saturé par du carbone ou de l'azote qui forcent des solutions internes souhaitées, la diffusion se déroule beaucoup plus facilement qu'en saturation par des métaux qui forment des solutions solides de substitution.

Dans les solutions solides interstitielles, les atomes de carbone et d'azote se déplacent facilement entre les positions interstitielles, ils sautent facilement d'une position interatomique à une autre. La diffusion dans les solutions solides de substitution exige qu'une partie des atomes quittent les points du réseau (et ils sautent dans des positions interstitielles) et que les lacunes qui en résultent soient occupées par les atomes diffusants. Naturellement, un tel mouvement est beaucoup plus prêté.

En raison du faible taux de diffusion lorsque le fer (ou l'acier) est saturé par des métaux qui forment des solutions de substitution, ce processus doit être effectué à des

températures élevées et de longs temps de maintien pour obtenir une couche diffuse d'une profondeur suffisante.

Tout le traitement thermochimique comprend trois processus élémentaires :

- 1) Les processus qui ont lieu dans le milieu externe et entraînent la libération de l'élément diffusant dans un état atomique (ionique), par exemple, la dissociation de l'ammoniac avec la libération de l'hydrogène atomique ($2\text{NH}_3 \leftrightarrow 2\text{N} + 6\text{H}$) ou la décomposition du monoxyde de carbone pour produire du carbone atomique ($2\text{CO} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$).
- 2) Contact des atomes diffusants avec la surface à traiter et formation de liaisons chimiques avec les atomes de fer de la pièce en acier (adsorption).
- 3) Pénétration de l'élément saturant en profondeur dans le métal de base, c'est à dire, diffusion.

La concentration de l'élément diffusée sur la surface dépend du potentiel du milieu environnant, qui assure un approvisionnement suffisant des atomes de cet élément à la surface, et de la vitesse de diffusion qui permet à ces atomes de pénétrer dans le métal.

La profondeur de pénétration est déterminée par la vitesse qui, dans un cas particulier, dépend principalement de la température du procédé et de la concentration de l'élément diffusé à la surface.

La profondeur totale de la couche diffuse (y) varie avec le temps (t) le processus se poursuit, à une température donnée, dans une relation parabolique :

$$Y = k\sqrt{t}$$

Cette équation montre qu'au cours du temps, la vitesse à laquelle la couche augmente, est réduite. Ceci est associé à la réduction du gradient de concentration entre toutes les zones voisines au fil du temps. Le gradient de concentration est l'un des principaux facteurs qui déterminent le taux de diffusion.

Plus la concentration de dispersion à la surface du métal est élevée, plus la couche diffuse est profonde et toutes les autres conditions sont égales.

Des températures plus élevées deviennent naturellement le taux de diffusion. Plus la température est élevée, plus la couche diffuse obtenue est profonde dans un intervalle de temps donné.

La quantité de substance (g) diffusée en temps unitaire (seconde) à travers la surface unitaire (cm^2) à un gradient de concentration unitaire est appelée le coefficient de diffusion (D , cm^2/sec).

La variation du coefficient de diffusion avec la température est exprimée par l'équation suivante :

$$D = D_0 \cdot e^{\frac{-Q}{RT}}$$

Dans laquelle :

- D : coefficient de diffusion.
- D_0 : facteur de fréquence (dépend du matériau) (cm^2/s).
- Q : est la chaleur de diffusion (énergie d'activation, par exemple, l'énergie requise pour que l'atome saute vers une nouvelle position dans le réseau)
(Cal/ g-atome).
- R : constante des gaz (1,98).
- T : température absolue (k°).

Plus la valeur de Q est élevée, plus la valeur de D est basse à une certaine température, plus la vitesse de diffusion est lente et plus la température et la durée de la période de traitement thermique sont élevées pour obtenir une certaine profondeur de la couche diffusée [1].

I.2. Les différents traitements thermochimiques

I.2.1. Boruration

La boruration est l'une des méthodes récentes de durcissement de surface, qui peut être appliquée à n'importe quel matériau ferreux mais elle est généralement adoptée pour les aciers au carbone et les aciers à outils.

Ils existent différents procédés de boruration : Boruration par voie liquide (électrochimique et chimique dans des sels fondus ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (850-1050°C), KBF_4 (600-850°C), Boruration par voie gazeuse (Diborane B_2H_6 en présence H_2 , Halogénures (BF_3 , BCl_3 , BBr_3 , Boruration par voie solide (B_4C , SiC , KBF_4), ($\text{B}_4\text{C}+\text{Na}_2\text{CO}_3$), et Boruration par voie ionique.

Dans le cas de la Boruration par voie solide, les composants sont emballés dans des boîtes résistantes à la chaleur avec des mélanges de granulés ou de pâte de carbure de bore ou d'autres composés du bore avec des ajouts d'activateurs et de diluants à 900–1000 ° C. Le bore se diffuse vers l'intérieur et des couches de borures de fer (FeB et Fe_2B) se forment. Sur la surface externe, la phase FeB se forme, tandis qu'à l'intérieur, la phase Fe_2B se forme. La phase FeB est plus fragile et n'est pas souhaitable. Des températures plus élevées, des temps

de traitement plus longs et des aciers fortement alliés favorisent la formation de la phase FeB. Les couches de borure sont très dures. La dureté des couches de borure produites sur les aciers au carbone dépasse celle de l'électrodéposition de chrome dur, des aciers à outils trempés et du carbure de tungstène. La dureté des couches de borure sur l'acier est comprise entre 1500 et 2100HV. Les profondeurs des couches de borure varient de 0,012 à 0,127 mm, selon le matériau et l'application, la profondeur de couche étant adaptée à l'application prévue :

- ✓ Couches épaisses (jusqu'à 0,127 mm) - pour une usure abrasive.
- ✓ Couches minces (jusqu'à 0,025 mm) - pour réduire l'adhérence et la friction.

Le temps de traitement requis pour une profondeur de couche de 0,15 mm est de 6 heures à environ 900 ° C. Dans ce processus, la température de traitement est très élevée, et donc le durcissement des composants avant la boruration n'est pas nécessaire. Uniquement Dans le cas des aciers à outils, il faut faire la trempe et le revenu après la boruration pour avoir les propriétés mécaniques souhaitées.

La boruration ne peut être appliquée de manière sélective qu'à la zone à durcir. La couche borurée peut être polie pour une finition élevée. Il peut être appliqué uniformément sur des formes irrégulières.

La boruration augmente la durée de vie des outils et des moules en améliorant la résistance à l'usure abrasive, glissante et adhésive. Il réduit l'utilisation de la lubrification car son faible coefficient de friction. Mais une température de process élevée peut entraîner la distorsion du composant. De plus, le composant présente une faible résistance à la fatigue et à la corrosion.

Cependant, en raison des avantages liés à l'usure fournis par la couche de bore, combinés à la large gamme de substrats compatibles et à la nature rentable du processus, la boruration est utilisée avec succès pour la résistance à l'usure générale des composants en acier au carbone. De plus, en raison de sa température et de sa résistance à l'usure, la boruration est également un bon choix pour certaines applications d'outillage comme dans les matrices de forgeage à chaud, les matrices de tréfilage, les matrices d'extrusion, les rouleaux de redressage, les lingotières, etc. Elle est également utilisée pour les composants généraux, y compris les buses, plongeurs, engrenages, arbres et rouleaux. Les composants de pétrole et de gaz (tubes de production, composants de valve, garnitures de valve, joints métalliques, buses de brûleur à charbon / fioul, etc.) utilisent également cette technique. Les autres applications diverses comprennent les composants de turbine, les roues de pompe, les robinets à tournant sphérique et les sièges, le manchon de protection d'arbre et les barres de guidage [2].

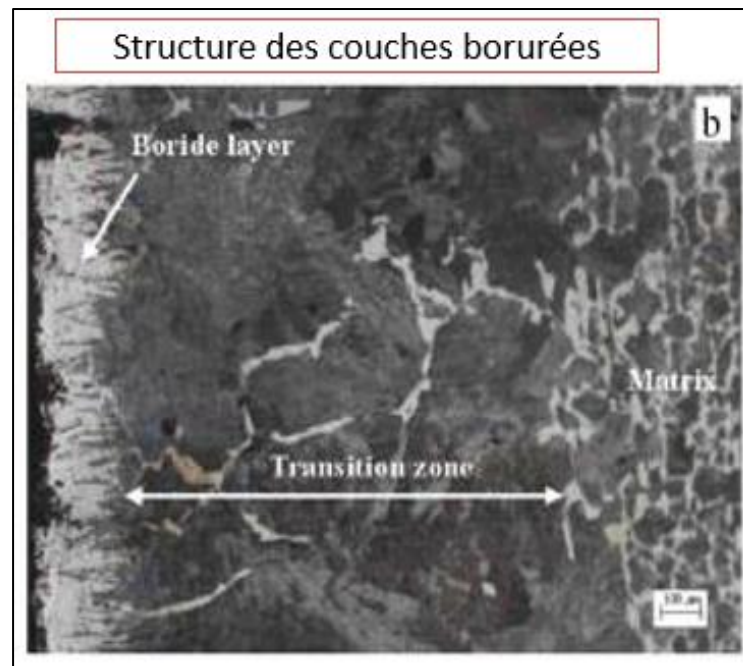


Figure 1: Structure des couches borurées [3].

A. Les propriétés des couches de borure

- ✓ Valeurs de dureté élevées.
- ✓ Alliages ferreux 1600 à 2100 HV.
- ✓ Alliages à base nickel 2800 HV.
- ✓ Titane jusqu'à 4000 HV.
- ✓ Adhérence optimale.
- ✓ Faible tendance à la soudure à froid.
- ✓ Coefficients de dilatation comparables pour tous les alliages ferreux.
- ✓ Bonne résistance à la température.
- ✓ Très bon comportement à la corrosion (Milieux très agressifs, H₂SO₄, HCl).

Tous les matériaux ferreux de la construction de machines, de véhicules et d'appareils sont adaptés à un traitement de boruration. Mais il est également possible de borurer avec succès les aciers à outils fortement alliés, les aciers pour travail à chaud et les aciers inoxydables, les métaux frittés, les fontes grises et sphéroïdales, ainsi que le métal dur. Les alliages à base nickel comme par exemple l'inconel, l'hastelloy ou le Nimonic ont une excellente résistance à la corrosion et sont souvent utilisés pour des applications à haute température. Les surfaces borurées montrent par contre une résistance à l'usure significativement meilleure jusqu'à des températures de service élevées tout en réduisant

l'adhérence. Dans l'industrie aéronautique et chimique, le titane et ses alliages (par exemple Ti6Al4V) sont souvent borurés [4].

B. Applications

La boruration est appliquée aux pièces employées dans l'industrie pétrolière, bagues de pompes à boue, les matrices et estampes pour le formage à chaud. La boruration est un procédé que peuvent subir tous les aciers, car elle confère aux pièces une grande résistance à l'abrasion et à l'usure.

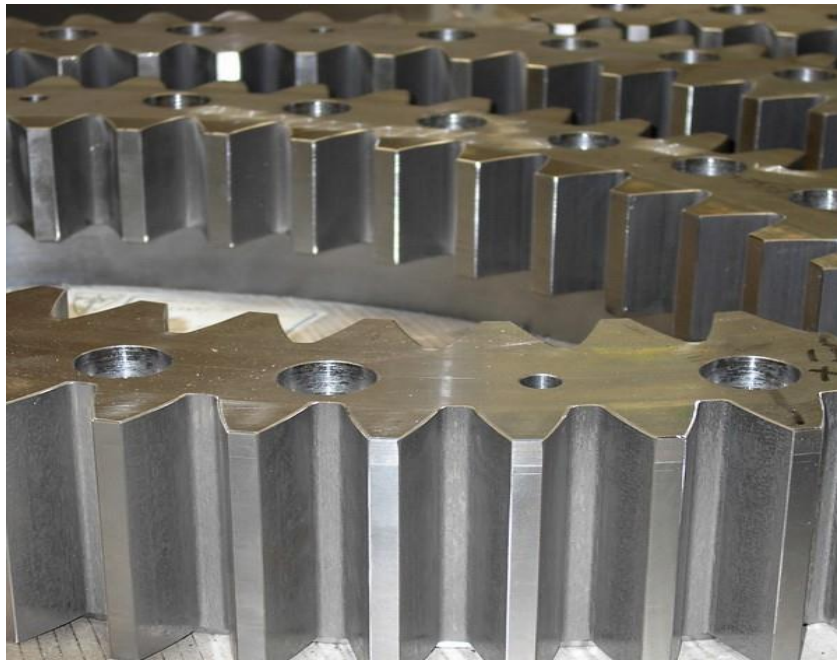


Figure 2: Couche de boruration sur l'engrenage [4].

I.2.2. Nitruration

Elle fut découverte en 1923 par un technicien de la firme Krupp qui, ayant chauffé un acier dans une atmosphère d'ammoniac, observa une dureté superficielle anormalement élevée. La nitruration est le processus de saturation de la surface de l'acier avec de l'azote en le maintenant pendant une période prolongée à une température allant de 480 °C à 650°C (lorsque l'acier est ferritique) dans une atmosphère à l'ammoniac (NH_3). La nitruration augmente la dureté de la surface à un degré très élevé (une dureté élevée est maintenue même lorsque l'acier est ensuite chauffé à 600-650 °C). Il augmente également la résistance à l'usure, la limite de fatigue et la résistance à la corrosion dans des milieux tels que l'atmosphère, l'eau, la vapeur [1] .

Les aciers soumis à la nitruration sont des aciers moyennement carbonés. L'azote pénètre lentement dans la surface de l'acier et se combine avec le métal de base (le fer) et les

éléments d'alliage tels que l'aluminium, le chrome, le vanadium et le molybdène qui pourraient être présents dans l'acier sélectionné pour former des nitrures durs, Parmi ceux-ci, les nitrures d'aluminium offrent la dureté de surface la plus élevée, tandis que les nitrures de chrome, de vanadium et de molybdène donnent un boîtier plus profond et plus résistant.

Pour améliorer la qualité de la nitruration, certaines exigences de pré-nitruration sont importantes, notamment :

- ✓ Les aciers doivent être exempts de décarburation. La nitruration d'un acier décarburé provoque une croissance excessive et la couche devient très fragile et sensible à la fissuration et à l'écaillage.
- ✓ La normalisation et le recuit sous-critique doivent se produire avant le durcissement du cœur.
- ✓ Les aciers doivent être trempés et revenus.
- ✓ La température de nitruration doit être inférieure d'au moins 28 ° C à la température de revenu des aciers à cœur durci [5].

Les inconvénients sont le temps de traitement qui peut atteindre 70 h, une faible profondeur durcie donc une faible usure tolérable, peu de résilience, de faibles contraintes et déformations admissibles en service ainsi qu'un léger gonflement des pièces.

A. Microstructure d'une couche nitrurée

Quel que soit le procédé de nitruration ainsi que la nuance d'acier utilisée, une surface nitrurée est composée de trois zones distinctes (Figure 3) qui sont :

- La couche de combinaison aussi appelée « couche blanche » du fait de sa couleur blanche après attaque aunital 3% (mélange de 3% d'acide nitrique avec de l'éthanol). Cette couche présente une épaisseur comprise entre 0 et 50 μm .
- La couche de diffusion, pouvant avoir une épaisseur de 1 mm dans le cas de traitements de nitruration supérieur à 100 h. Au sein de celle-ci l'azote se trouve en solution solide d'insertion dans la matrice ferritique et sous forme de nitrures nanométriques.
- Le matériau à cœur non traité de type trempé revenu [6].

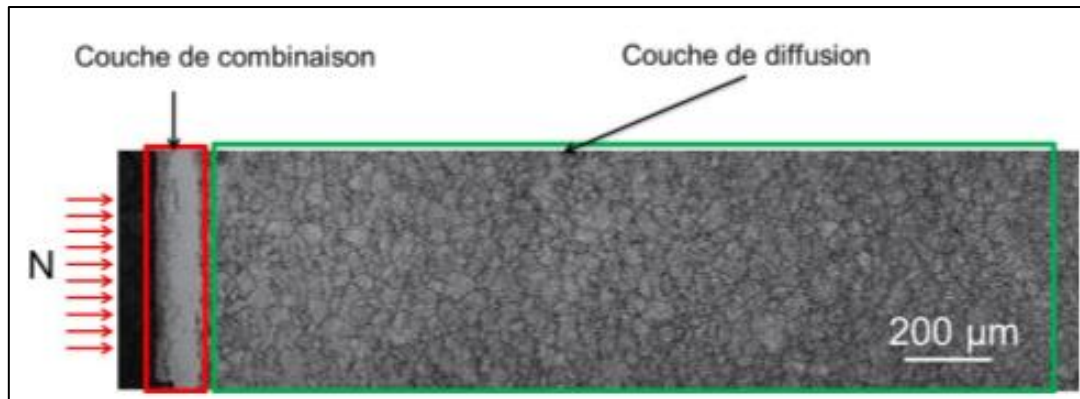


Figure 3: Micrographie optique de la surface nitrurée de l'acier 33CrMoV12-9 [6].

B. Avantage de nitruration

Le procédé de traitement de nitruration est un traitement superficiel qui consiste à plonger des pièces en alliages ferreux spéciaux (aciers au chrome-aluminium) dans un milieu susceptible de céder de l'azote (autrefois appelé nitre) en surface, à une température comprise entre 300 °C et 580 °C où l'azote peut diffuser de la surface vers le cœur de la pièce. Une fois le traitement effectué on peut observer deux couches :

- La couche de combinaison, en surface, d'une épaisseur approximative de 20 µm, elle est composée de nitrures ϵ et γ' .
- La couche de diffusion plus épaisse (100 à 1000 µm), si le métal contient des éléments d'alliage il se forme des précipités de nitrures finement dispersés dans la zone de diffusion. Ces précipitations conduisent à un durcissement important, les niveaux de dureté obtenus sont compris entre 400 et 1300 HV (dureté Vickers) et cette dureté peut être conservée jusqu'à des températures de l'ordre de 500 °C. La couche de diffusion est donc plus dure que la couche de combinaison [4].

C. Les propriétés de nitruration

La nitruration donne les propriétés suivantes :

- Augmentation de la résistance à l'usure grâce à une dureté accrue et meilleure résistance de la couche superficielle.
- Diminution du coefficient de friction et par conséquent amélioration des priorités tribologiques (moins de chaleur due au frottement).
- Diminution de l'adhérence sur les pièces d'usure, ce qui signifie une tendance plus faible à la microsoudure à froid.

- Abaissement de la propension à réagir avec les matières environnantes. La couche de combinaison protège la surface contre les influences d'une tribo-oxydation comme, par exemple, la corrosion par frottement [7].

I.2.3. Nitrocarburation

La nitrocarburation est une variante du processus de nitruration. Il s'agit d'un processus de diffusion thermochimique où des atomes d'azote, de carbone et, dans une très faible proportion, d'oxygène sont diffusés dans la surface de la pièce en acier, formant une couche de combinaison en surface, et une couche de diffusion [8]. La nitrocarburation est une variation de la couche nitrurée peu profonde du processus de nitruration. Le traitement est principalement utilisé pour améliorer les propriétés d'usure et de fatigue et pour améliorer la résistance à la corrosion. Les domaines d'application communs incluent les engrenages et les pièces de moteur.

Plusieurs types de milieux de traitement peuvent être utilisés - gaz, liquide ou plasma. La nitrocarburation gazeuse est la plus couramment utilisée dans l'industrie à ce jour et la seule traitée en détail ici. Outre le procédé, les procédés de nitrocarburation peuvent également être divisés en fonction de la température à laquelle le traitement a lieu. Au-dessous de la température de transformation partielle en austénite A1, le processus est appelé nitrocarburation ferritique, car à ces températures, le matériau de base est toujours en phase ferritique. À des températures plus élevées, la ferrite commence à se transformer en austénite et, par conséquent, ces traitements sont appelés nitrocarburation austénitique. La température de transformation exacte varie en fonction de la composition. La température la plus basse pour laquelle elle se produit dans un alliage de fer, de carbone et d'azote est 586 °C [9].

A. Processus

Le procédé de nitrocarburation consiste en trois étapes principales : le chauffage, la diffusion à la température de nitrocarburation et le refroidissement. Le préchauffage pour accélérer le processus de nitrocarburation et la post-oxydation pour améliorer la résistance à la corrosion sont des étapes facultatives. La nitrocarburation ferritique dans le gaz est couramment effectuée à des températures allant de 560 à 580 °C.

La composition de l'atmosphère est un paramètre très important dans la nitrocarburation gazeuse et doit être étroitement contrôlée. L'atmosphère est constituée d'azote (N₂), d'ammoniac (NH₃), de dioxyde de carbone (CO₂) et d'hydrogène (H₂). L'ammoniac est utilisé comme source d'azote. Le dioxyde de carbone se décompose en monoxyde de carbone qui, avec l'hydrogène, est nécessaire pour le transfert de carbone à la surface de l'acier.

Parfois, le monoxyde de carbone est utilisé directement au lieu du dioxyde de carbone. L'hydrogène n'est pas toujours ajouté séparément car il se forme à partir de la décomposition de l'ammoniac. L'azote est utilisé pour contrôler le pourcentage des autres gaz et pour purger le four avant et après le traitement, car l'ammoniac peut former un mélange explosif avec l'oxygène [9].

B. Microstructure d'une couche nitrocarburée

La nitrocarburation introduit plus d'atomes d'azote que de carbone dans l'acier et les compositions de phases trouvées sont plus similaires à celles trouvées dans le système Fe-N que dans le système Fe-C. Au cours de la nitrocarburation du fer, l'évolution microstructurale de la couche de composé commence par la formation de cémentite riche en carbone et se développe dans la direction du nitrogène et des phases pauvres en carbone de ϵ et γ . Les deux étapes sont la conséquence d'une solubilité plus élevée de l'azote dans l' α -Fe que du carbone et d'un taux de transfert d'azote plus faible du gaz dans la phase solide. Après nitrocarburation ferritique, la microstructure se compose de trois zones : une couche composée à la surface, une zone de diffusion juste en dessous et plus loin dans le matériau de base non affecté. Une vue schématique est illustrée à la figure (4a). La couche composée a généralement une épaisseur de 2 à 30 μm et se compose des carbonitrides de fer $\epsilon\text{-Fe}_2(\text{C}, \text{N})_{1+x}$ et $\gamma'\text{-Fe}_4(\text{C}, \text{N})_{1-z}$ ainsi que de la cémentite $\theta\text{-Fe}_3\text{C}$. La phase ϵ a une structure cristalline hexagonale alors que γ' est cubique tableau (1). La zone de diffusion peut atteindre 0,1 à 0,5 mm d'épaisseur et se compose de carbone et d'azote en solution solide interstitielle dans le matériau de base combinée à de petits précipités de carbure et de nitrure [9] et [10].

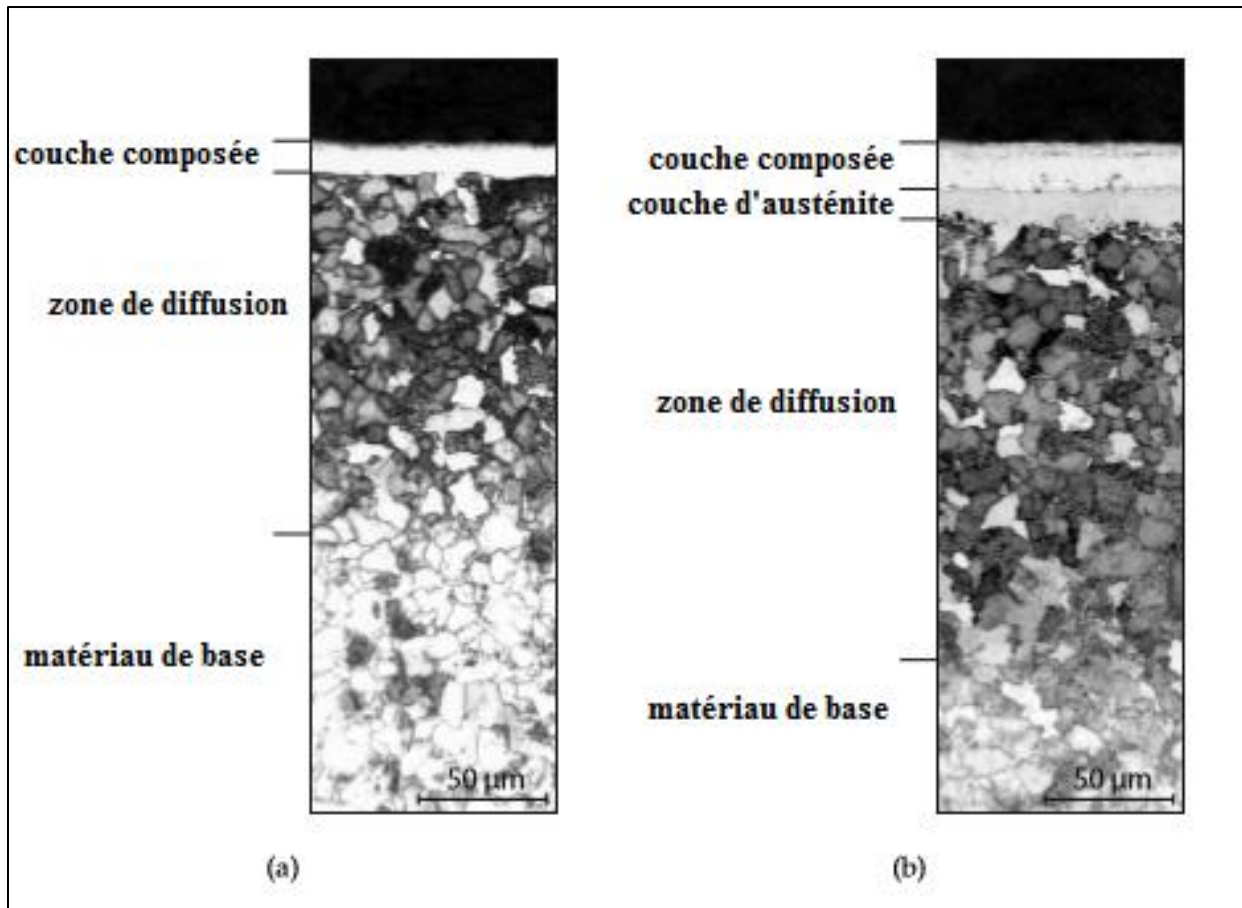


Figure 4: Microstructure typique des échantillons ferritiques (a) et austénitiques (b).

Tableau 1: Caractéristiques des phases du système Fe-N-C à 580-590 °C [10].

Les phases	N (at. %)	C (at. %)	Structure cristallographie	Arrangement d'atomes
α -Fe	0-37	0-0.02	Fe bcc	N, C dans les sites octaédriques
θ -Fe ₃ C	0	25	Fe orthorhombique compliqué	c dans le prisme trigonal bicapé
γ' -Fe ₄ N _{1-z}	19.4-20	<0.7	Fe cfc	N ordonné dans les sites octaédriques centraux
ϵ -Fe ₂ (N,C) _{1+x}	15-33	0-8	Fe hc	N ordonné dans le site octaédrique

C. Avantages

- Relativement économique.
- Épaisseurs de la couche de combinaison possibles jusqu'à 20 μm .
- Haute résistance à l'usure.
- Excellente résistance au frottement et au grippage.
- Propriétés de résistance à la fatigue améliorées jusqu'à 120 %.
- Résistance à la corrosion considérablement améliorée.
- Bonne finition de surface.
- Déformation de forme négligeable.
- Substitution d'alliage – les aciers au carbone ordinaire remplaçant les aciers faiblement alliés [8] et [11].

I.2.4. Carbonitruration

La carbonitruration est un traitement thermochimique de diffusion de carbone et d'azote.

L'azote comme le carbone diffusent en solution solide d'insertion dans le fer, toutefois l'azote n'est pas utilisé comme le carbone pour obtenir une solution sursaturée du type martensitique après refroidissement rapide, mais seulement pour modifier les cinétiques de réaction du milieu carburant et de diffusion du carbone dans l'acier ainsi que la cinétique de la transformation martensitique.

L'azote a deux effets :

- Augmente le domaine de la solubilité du carbone dans l'austénite par abaissement des points de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$.
- Abaisse le point M_s et augmente la stabilité de l'austénite de la couche carbonitrurée par rapport à une couche cémentée à teneur en carbone équivalente, augmentant ainsi fortement la trempabilité.

De ces considérations, il résulte un certain nombre d'avantages de la carbonitruration par rapport à la cémentation :

- Réduction du temps de traitement
- Abaissement de la température de traitement (780 à 875 °C)
- Augmentation de la trempabilité de la couche enrichie, permettant d'obtenir, à vitesse de refroidissement donnée, un meilleur durcissement (cas des aciers non alliés) ou permettant de réduire la vitesse de refroidissement (cas des aciers alliés) [12].

Les agents de carbonituration sont liquides ou gazeux. Ce traitement est suivi d'une trempe généralement à l'huile ou à l'air, est effectuée soit à la sortie des pièces du four après refroidissement, soit après un deuxième chauffage. On a recours par la suite à un revenu à basse température (180°C).

La dureté obtenue est de l'ordre de 62 HRC. Une épaisseur cémentée de 0,5 à 0,7 mm demande environ 3 heures de traitement. La couche carbonitrurée doit avoir une structure martensitique à grains fins, une faible quantité de carbonitrures et environ 20 à 30% d'austénite résiduelle [13].

A. Avantage de Carbonituration

- Bonne résistance à l'usure et à la corrosion.
- Une bonne tenue en service et une grande dureté superficielle.
- La couche superficielle de l'acier non allié ainsi que de l'acier de décolletage et de construction peut être trempée.
- Bonne protection contre l'usure sur la surface des pièces- cœur dur élastique.
- Le risque de casse des composants est fortement réduit.
- Trempe partielle possible [14].

I.2.5. Cémentation

A. Définition

La cémentation est un processus dans lequel le métal ferreux (l'acier) austénitisé est mis en contact avec un environnement à potentiel de carbone suffisant pour provoquer l'absorption du carbone à la surface et, par diffusion, créer un gradient de concentration de carbone entre la surface et l'intérieur du métal. L'objectif principal de la cémentation et du durcissement des pièces est d'obtenir une dureté et une résistance à l'usure élevées des couches superficielles tout en conservant un cœur doux et tenace. Pour ce procédé, des aciers à faible teneur en carbone (jusqu'à un maximum d'environ 0,30% de carbone), avec ou sans éléments d'alliage (nickel, chrome, manganèse, molybdène), sont normalement utilisés [5].

On sait que le durcissement superficiel d'un alliage fer-carbone par transformation martensitique est directement relié à sa teneur en carbone. La recherche d'une dureté maximale conduit à obtenir des teneurs superficielles en carbone comprises entre 0,7 et 0,9 % de carbone. Appliquée sur un acier à faible teneur en carbone, la cémentation est un moyen de durcissement superficiel permettant d'assurer une forte mise en précontrainte de compression de la surface et une bonne résistance à l'usure grâce à l'obtention d'une martensite à haute teneur en carbone, tout en garantissant à cœur une bonne ductilité par l'obtention d'une

martensite à bas carbone (Figure 5) (la transformation du cœur sera, selon la trempabilité de l'alliage et la section de la pièce à traiter, totale ou partielle). Les profondeurs de diffusion du carbone seront pratiquement limitées à 4 mm pour des raisons économiques évidentes. Les fortes profondeurs seront réservées aux pièces de mécanique lourde, les plus courantes variant de 0,3 à 2,5 mm [12].

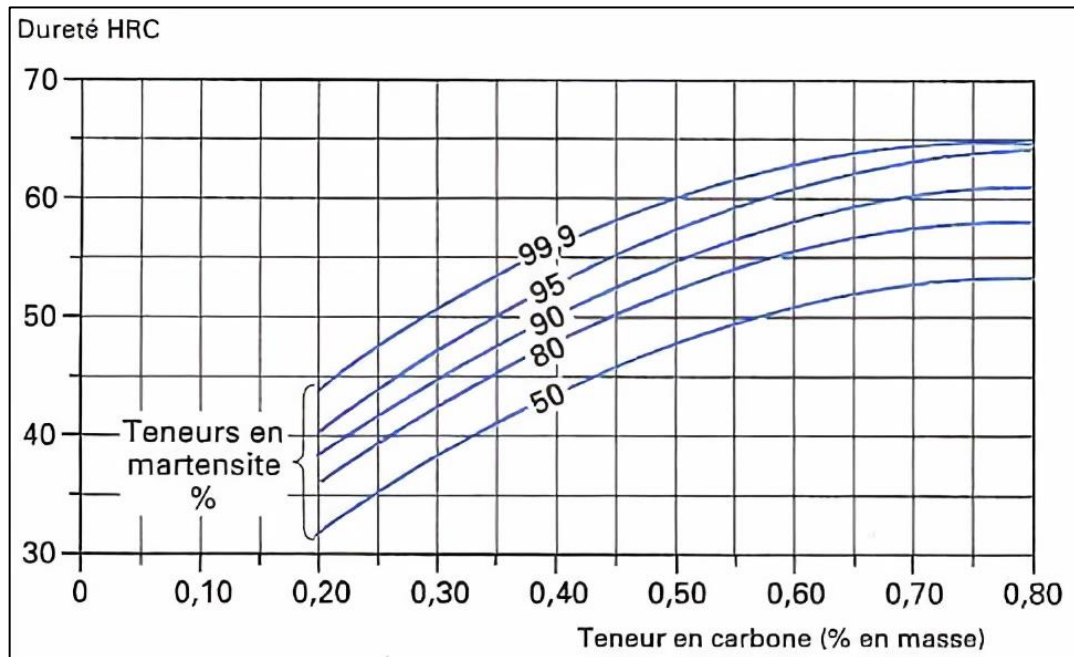


Figure 5: Évolution de la dureté en fonction de la teneur en carbone pour divers taux de martensite.

Le traitement se décompose en deux phases distinctes :

- ✓ Enrichissement de la surface en carbone à haute température (généralement 900 à 980°C). On distingue trois types de cémentation suivant l'état du milieu cémentant : cémentation solide, cémentation liquide, cémentation gazeuse.
- ✓ Trempe de la pièce afin d'obtenir une structure martensitique en surface (< 900 HV) et une structure plus douce (bainite) à cœur. La trempe est réalisée soit directement :
 - Après cémentation (trempe directe).
 - Soit après refroidissement du métal et réchauffage ultérieur. La couche cémentée atteint le maximum de dureté (environ 800 à 900 HV) après la trempe martensitique pour des teneurs en carbone voisines de l'eutectoïde. Un éventuel revenu de détente (entre 180°C et 200°C) après trempe ramènerait la dureté aux environs de 600HV à 760HV [15].

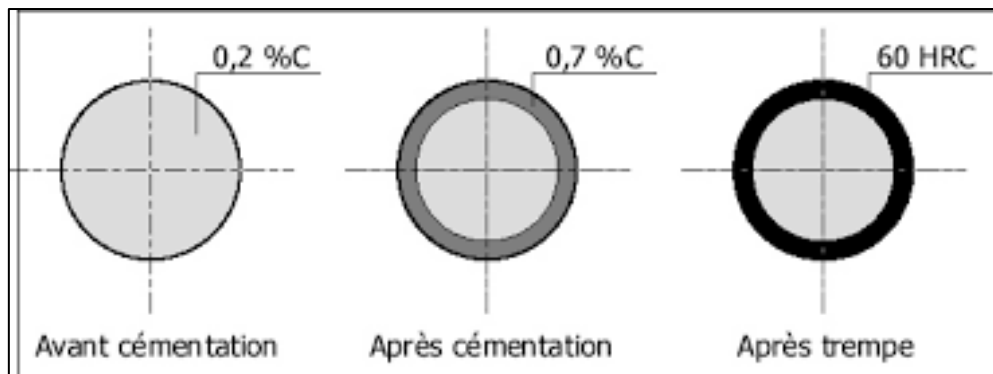


Figure 6: Principe de la cémentation [15].

B. Principe de la cémentation

Dans ce processus, le carbone est diffusé dans l'acier en chauffant au-dessus de la température de transformation et en maintenant l'acier en contact avec un matériau carboné qui peut être un milieu solide, un liquide ou un gaz. Dans de telles conditions, le carbone est absorbé en solution solide dans l'austénite. Comme la solubilité du carbone est plus à l'état austénitique qu'à l'état ferritique, l'état entièrement austénitique est essentiel pour la cémentation [2].

La cémentation se déroule en deux étapes :

- ✓ L'absorption de carbone libre sur la surface de l'acier se produit en raison d'une grande différence entre le potentiel de carbone de l'atmosphère et la teneur en carbone de la surface de l'acier. Le taux d'absorption de la teneur en carbone supplémentaire sur la surface augmente avec une augmentation de la teneur en carbone de la surface jusqu'à ce qu'elle devienne égale à celle de l'atmosphère.
- ✓ La diffusion du carbone de la surface vers l'intérieur se produit dans la deuxième étape. Dès que l'acier entre en contact avec l'atmosphère de cémentation, le carbone en surface atteint sa valeur maximale (C_s). Il reste constant tout au long du processus. La teneur en carbone de l'intérieur est la même que la teneur en carbone d'origine dans l'acier, C_0 . À un instant $t > 0$, la concentration en carbone varie linéairement avec la distance (figure 7). La première loi de diffusion de Fick régit ensuite la diffusion du carbone dans l'acier [16].

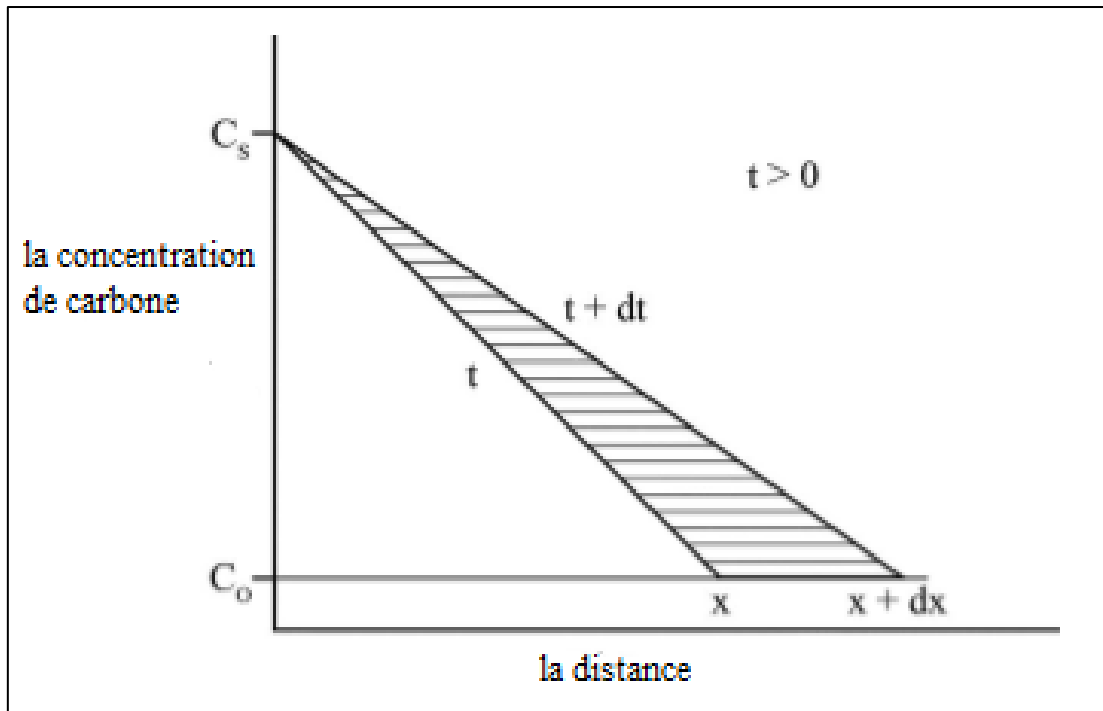


Figure 7: Variation de la concentration de carbone avec la distance [16].

La profondeur de la couche cémentée et la rapidité de l'opération sont fonction des trois paramètres suivants :

- ✓ Le pouvoir cémentant du ciment caractérisé par son potentiel carbone.
- ✓ La cinétique de réaction gaz-métal.
- ✓ La diffusion du C dans l'acier [15].

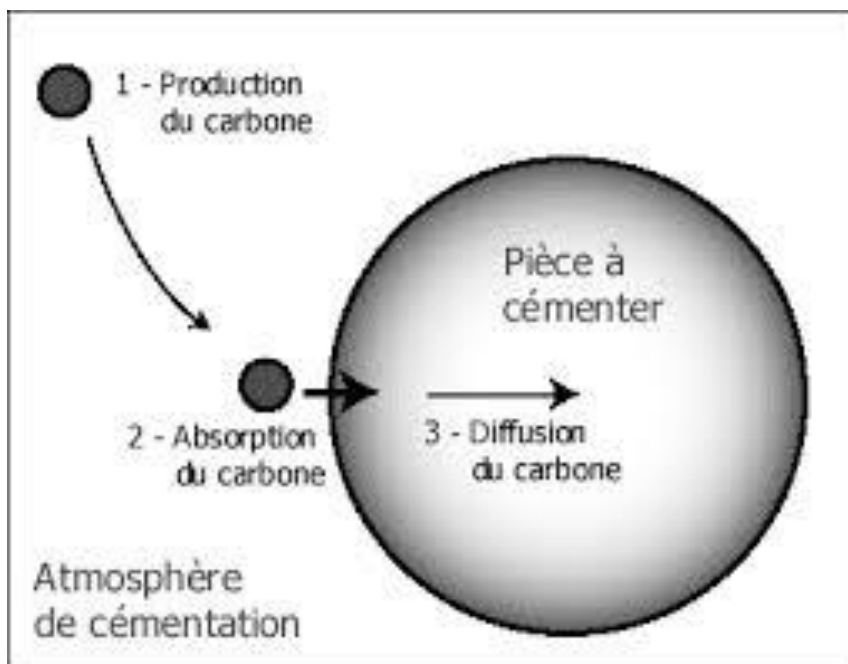


Figure 8: Phases de cémentation [15].

C. Les Procédés de cémentation

Il existe trois méthodes générales de cémentation, selon la forme du milieu de cémentation. Ces méthodes sont la cémentation solide ou en pack, en utilisant un matériau de cémentation solide : cémentation liquide : utilisant des bains fondus de sels de cémentation : et cémentation gazeuse, en utilisant des gaz d'hydrocarbures appropriés. Le choix de la méthode utilisée pour la cémentation dépend principalement de la caractérisation du boîtier requis, de l'équipement disponible et de la quantité de pièces à cémenter.

a. *Cémentation solide*

L'agent de saturation dans cette opération est un ciment solide, il n'est pratiquement plus utilisé industriellement. Le principe est de noyer les pièces à traiter dans un ciment solide à base de charbon et de bois, le tout étant maintenu dans une caisse fermée portée à la température de cémentation (900 à 950°C). Le ciment est constitué de carbone amorphe, généralement du charbon de bois (provenant de bois sélectionnés, exempts d'écorces) additionné d'un activateur, le carbonate de baryum $BaCO_3$. Il se présente soit sous forme de granulés reconstitués à partir d'un mélange de charbon de bois (60 à 75%) et de carbonate de baryum (25 à 40%) en poudre, soit sous forme de morceaux de charbon de bois finement concassés enrobés de carbonate de baryum en présence d'un lait de chaux comme fixateur [17].

D'une manière pratique, les pièces sont placées dans des caisses en acier réfractaire au chrome sur un lit de ciment, convenablement espacées les unes des autres et recouvertes d'une couche de ciment de 2 à 3 mm d'épaisseur, avant de disposer un second étage de pièces et ainsi de suite. Une fois pleine, la caisse est fermée par un couvercle et éventuellement lutée à la terre.

La caisse est placée dans un four où la température de cémentation varie de 910 à 930°C. Le maintien à la température de cémentation est de 7 à 9 min par centimètre de la dimension maximale de la caisse. Après cémentation, les caisses ne sont ouvertes qu'après leur refroidissement à l'air jusqu'à 400 ou 500°C. Généralement l'épaisseur de la couche à cémenter est choisie selon la température et durée de cémentation [18].

Tableau 2: Relation entre l'épaisseur de la couche à cémenter et la température et durée de cémentation [18].

Durée en heures		Epaisseurs de la couche de cémentation en mm				
		1 h	2 h	10 h	30 h	60 h
T en °C	850 °C	0.4 mm	0.8 mm	1.2 mm	1.5 mm	2.5 mm
	900 °C	0.6 mm	1.2 mm	1.5 mm	2.5 mm	4.5 mm

Le processus de cémentation par le charbon de bois, le coke, etc., s'explique comme suit :

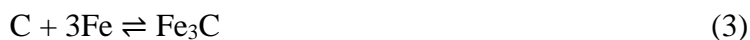
Formation de CO, se fait avec la décomposition du carbone amorphe contenu dans le ciment suivant la réaction (1) :



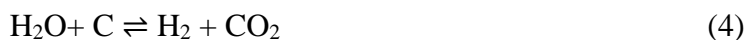
Ensuite, l'oxyde de carbone formé se décompose suivant la réaction (2).



Formant du carbure de fer ou de la cémentite suivant la réaction (3), puis comme Le carbone ou le carbure de fer dans les pièces, c'est quand on peut dire que la cimentation se produit.



Dans le cas du ciment enrobé, il s'ajoute un dégagement de vapeur d'eau dû au lait de chaux utilisé pour fixer le carbonate conduisant aux réactions d'équilibre du gaz à l'eau :



Le dégagement d'hydrogène est favorable à la réaction de cémentation.

Dans tous les cas, pour que l'absorption du carbone soit facilement vérifiée, il est nécessaire que l'acier soit à l'état austénitique, c'est-à-dire que le fer soit sous forme de fer γ .

Aujourd'hui ce procédé est encore intéressant pour réaliser des cémentations sur des pièces unitaires ou en faible quantité dont les dimensions sont supérieures à celles des fours de cémentation gazeuse.

Cette technique a été toutefois très largement utilisée dans l'industrie de série, notamment l'industrie automobile qui s'était dotée pour cela d'installations adaptées à la production de masse : fours poussants ou fours à sole tournante, équipés de systèmes de déversement des caisses, de récupération, de recyclage du ciment avec ajout contrôlé de

cément neuf, de remplissage des caisses. Elle a été abandonnée après le développement de la cémentation gazeuse à partir des années 60 [3].

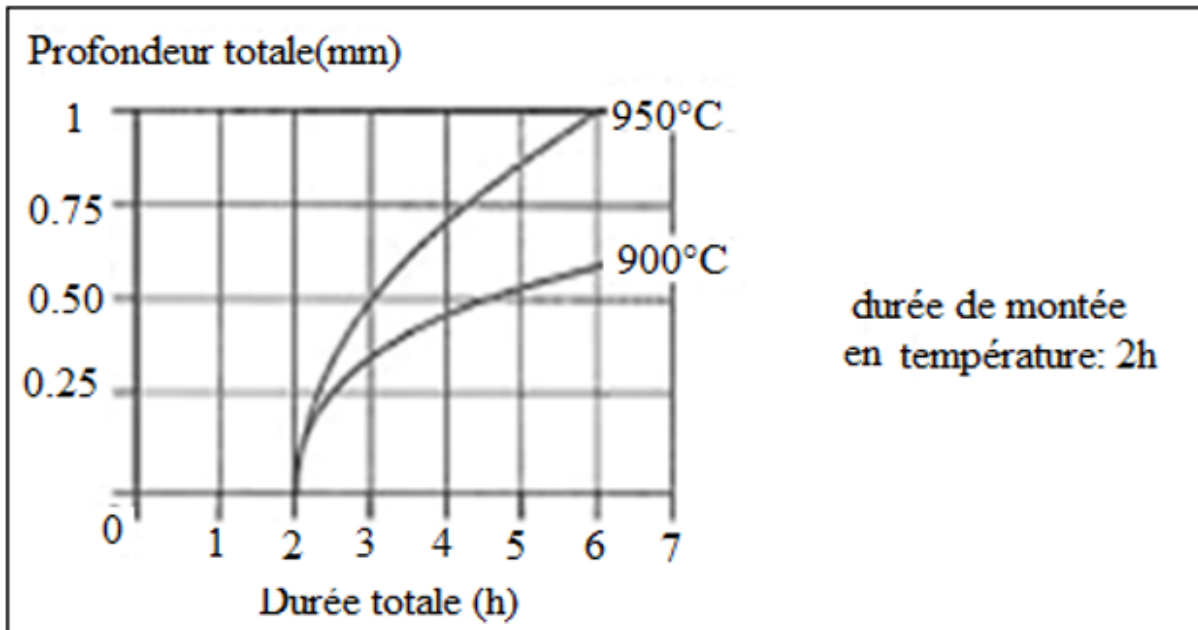


Figure 9: Relation entre la profondeur totale de cémentation et la durée totale de l'opération à température constante après cémentation en caisse [3].

b. Cémentation gazeuse

La cémentation gazeuse est la plus employée, elle utilise soit le procédé à l'azote et méthanol, soit le procédé par générateur endothermique. Dans les deux cas, il se forme dans le four une atmosphère composée de monoxyde de carbone et d'hydrogène. L'opération s'effectue à environ 950 °C[19].

Le traitement est réalisé dans un four étanche dans lequel on maintient une atmosphère contrôlée constituée d'un gaz support auquel on ajoute si nécessaire, pour atteindre le potentiel carbone souhaité, un gaz d'enrichissement en carbone, les réactions principales de cémentation gazeuse sont :



Où Fe (C) indique le carbone dissous dans l'austénite.



Le H_2 et le CO régénérés par la réaction (4) et (5) réagissent avec la surface en acier selon la réaction (2) et (3) pour provoquer un enrichissement de la surface en carbone. Il est donc évident que la source ultime de carbone dans la cémentation gazeuse est le CH_4 [20].

L'atmosphère de cémentation est constituée de :

- ✓ D'un gaz support faiblement actif. Différent type de gaz ou mélange de gaz sont utilisables, dans la suite nous parlerons uniquement du système Azote-Méthanol.
- ✓ D'un gaz d'enrichissement destiné à ajuster le potentiel carbone. C'est le débit de gaz qui est piloté par les divers capteurs de contrôle [15].

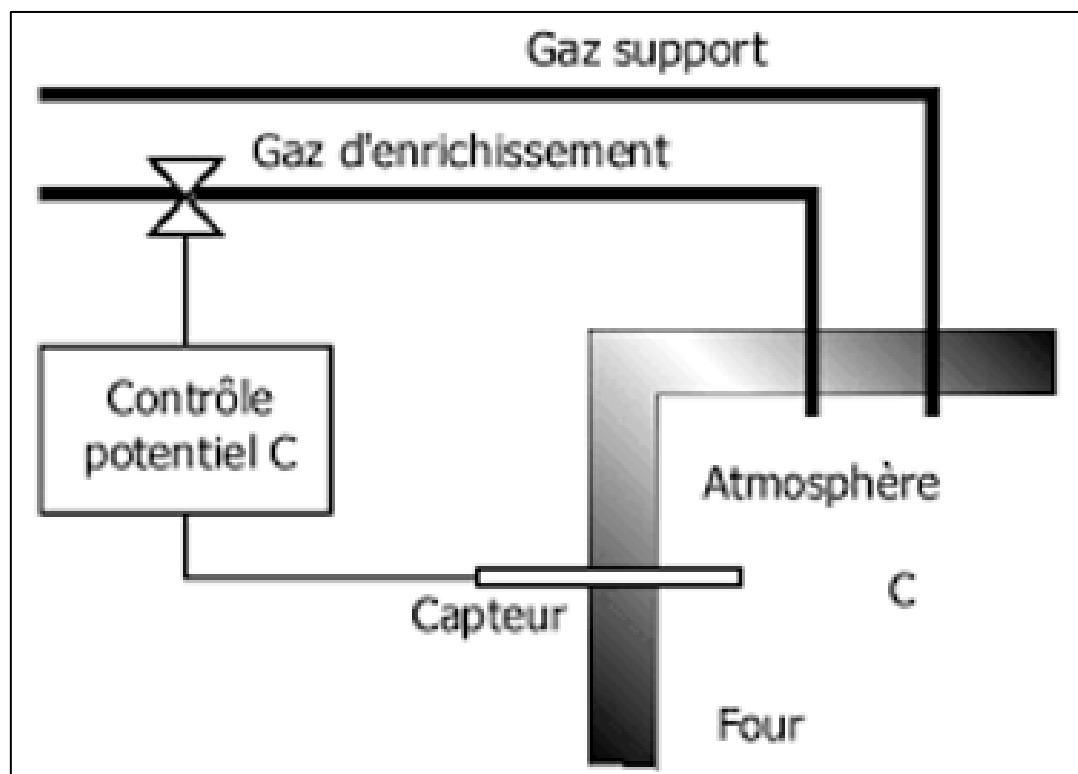


Figure 10: Cémentation gazeuse [15].

Gaz support Azote méthanol [21]

Azote et méthanol sont injectés dans le four de cémentation aux débits fixés par une canne d'injection. Le méthanol est pulvérisé finement dans le four par le débit d'azote. Aux températures rencontrées dans les fours de cémentation (supérieures à $750^{\circ}C$), le méthanol se dissocie en CO et H_2 .

Tableau 3: le méthanol se dissocie en CO et H₂.

Température (°C)	H ₂ (%)	CO (%)	CO ₂ (%)	H ₂ O (%)	CH ₄ (%)	N (5)	C (2)g/kg
700	61,3	21,4	5,3	7	4,8	80	72
750	63,2	26,7	2,93	4	3	85	41
800	64,3	30	1,45	2,24	1,9	89	19
850	65	31,7	0,69	1,23	1,24	91	7
900	65,5	32,6	0,33	0,69	0,83	92	2
950	65,9	32,9	0,16	0,4	0,58	93	0

(1) N : nombres de moles gazeuse.

(2) C (g/kg) : quantité de carbone en g déposé sous forme de suie par kg de méthanol.

L'avantage apporté par l'emploi de ces mélanges réside essentiellement dans la souplesse d'utilisation : arrêt immédiat de l'injection de méthanol, inertage instantané à l'azote pour la sécurité, possibilité de modulation du taux de CO par variation du rapport azote/méthanol, éventuellement en cours de cycle. L'exemple de la figure (11) montre l'effet du taux de méthanol sur la profondeur de cémentation. On voit également que le gain est peu sensible au-delà de 80 % de méthanol.

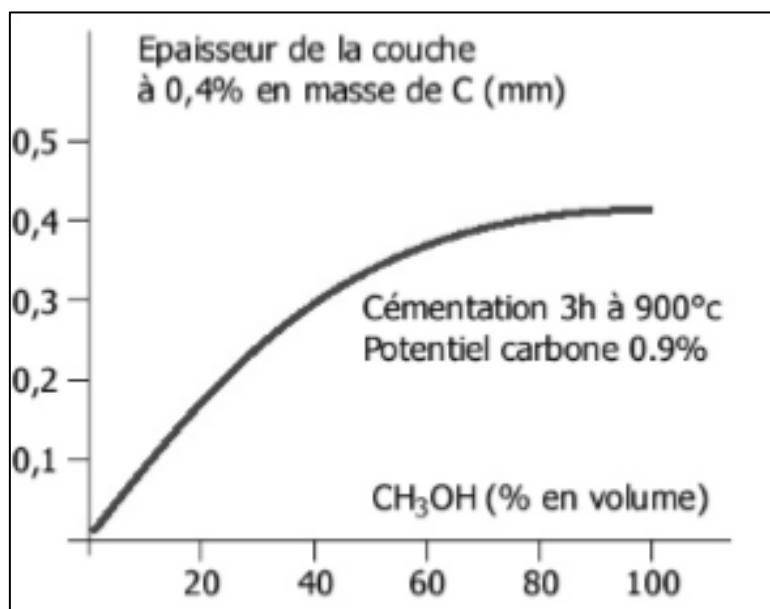


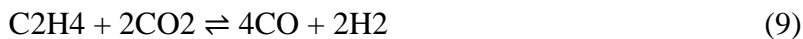
Figure 11: Influence du taux de méthanol.

Cette possibilité de modulation a largement contribué à l'optimisation des atmosphères de cémentation avec l'assistance d'un pilotage par un microprocesseur contenant des modèles

de calcul des paramètres de l'atmosphère en fonction des lois déterminant le cycle de cémentation. La technique d'injection de mélanges azote-méthanol peut être utilisée sur différents types de fours sous réserve que l'injection soit faite judicieusement et que les débits déterminant le taux de renouvellement soient adaptés au type de four.

Gaz d'addition (Enrichissement en carbone)[22]

Le rôle du gaz d'addition est d'augmenter le potentiel carbone de l'atmosphère de cémentation par abaissement des teneurs en éléments oxydants (CO₂ et H₂O). La source de carbone est un hydrocarbure (C₃H₈ ou CH₄). L'augmentation du potentiel carbone se fait suivant les réactions 6 et 7 pour le méthane, 8 à 10 pour le propane qui se dissocie en méthane et en éthylène.



La Figure (8) présente le transfert du carbone à l'acier qui se fait par des réactions complexes pouvant être résumées par l'équation (11) où C_a est le carbone « absorbé » par l'acier.



D'autres réactions (12 - 14) de cémentation peuvent prendre place simultanément avec la réaction (Eq. 11), mais sont plus lentes :



Dans la réaction (14), l'étape limitante est la division du monoxyde de carbone en oxygène et en carbone. Ce dernier ainsi absorbé, diffuse dans l'acier. Quant à l'oxygène, il se désorbe par réaction avec l'hydrogène pour former de la vapeur d'eau (Eq. 15) qui réagit à son tour avec la source de carbone pour boucler le cycle (Eq. 16). L'oxygène peut également se combiner avec le fer ou les éléments d'alliage pour former de l'oxydation superficielle visible la plupart du temps au joint des grains sur une épaisseur de quelques microns.



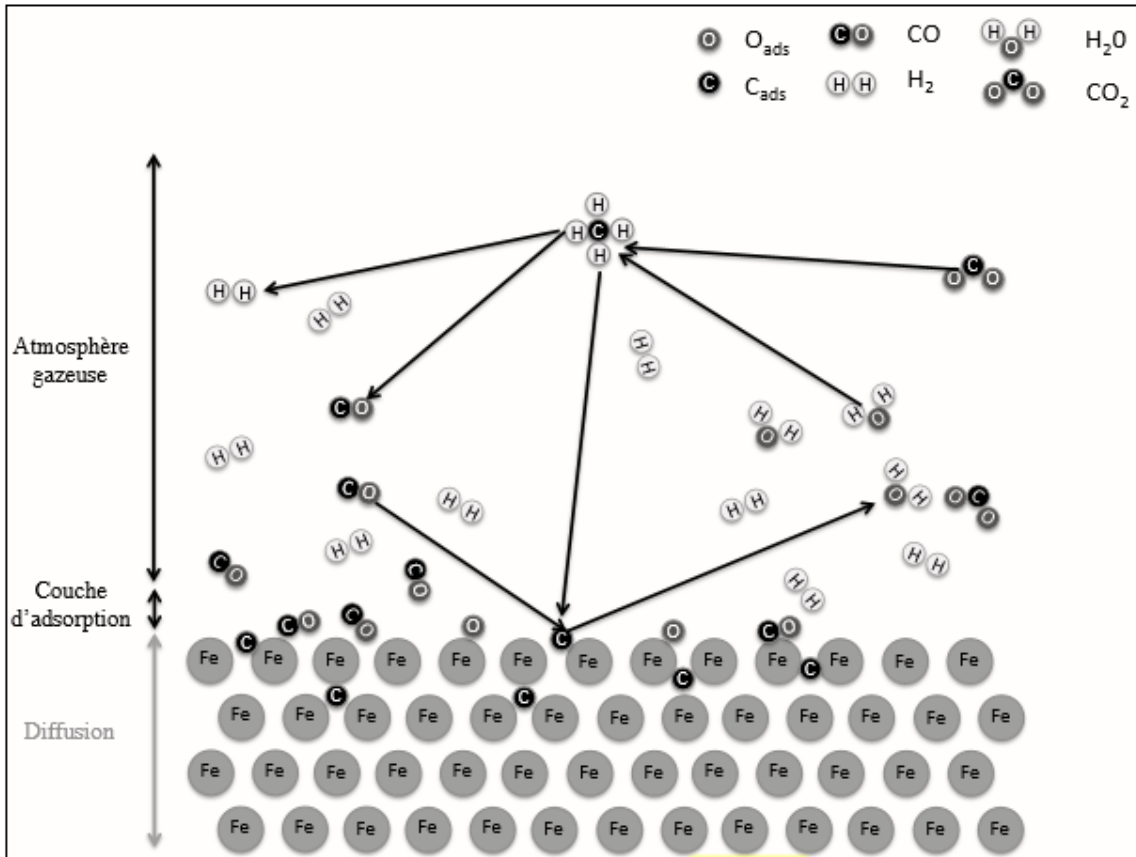
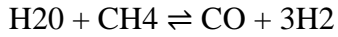


Figure 12: Schéma synthétique des réactions de transfert du carbone en cémentation gazeuse par le méthane.

Contrôle et régulation des atmosphères [23]

L'intérêt majeur de la cémentation en phase gazeuse réside dans la possibilité de contrôle des processus de transfert de carbone depuis l'atmosphère vers l'acier. Le paramètre déterminant du contrôle de l'atmosphère est le potentiel carbone. Il dénote la teneur en carbone à la surface d'un clinquant (en fer) en équilibre avec l'atmosphère carburant. Il est ainsi possible de quantifier la capacité de l'atmosphère à fournir du carbone à l'acier. Le tableau (4) décrit les différents moyens industriels disponibles pour contrôler le potentiel carbone dans les installations de cémentation atmosphérique. Très souvent, les fours de traitement thermochimique disposent de systèmes de mesures couples.

La sonde à oxygène est généralement utilisée pour sa réactivité afin de réguler le potentiel carbone. Les mesures de CO_2 et de CO servent d'alarme sur la dérive de la sonde à oxygène. Des systèmes de pilotage de cycle de cémentation sont ainsi réalisables à partir d'une boucle de régulation prenant les informations des capteurs (analyseur CO_2/CO , sonde à oxygène, fil résistif essentiellement) et comparant le potentiel carbone mesuré à la valeur de consigne. Le dispositif d'injection de gaz par électrovannes permet ensuite d'ajuster au mieux

la mesure à la consigne. Malgré les moyens de contrôle disponibles en cémentation atmosphérique, la répétabilité et l'uniformité des traitements n'est pas toujours garantie. Par ailleurs, la présence d'oxygène dans l'atmosphère de traitement est à l'origine d'oxydation intergranulaire (Figure 13) qui détériore les propriétés mécaniques des pièces traitées.

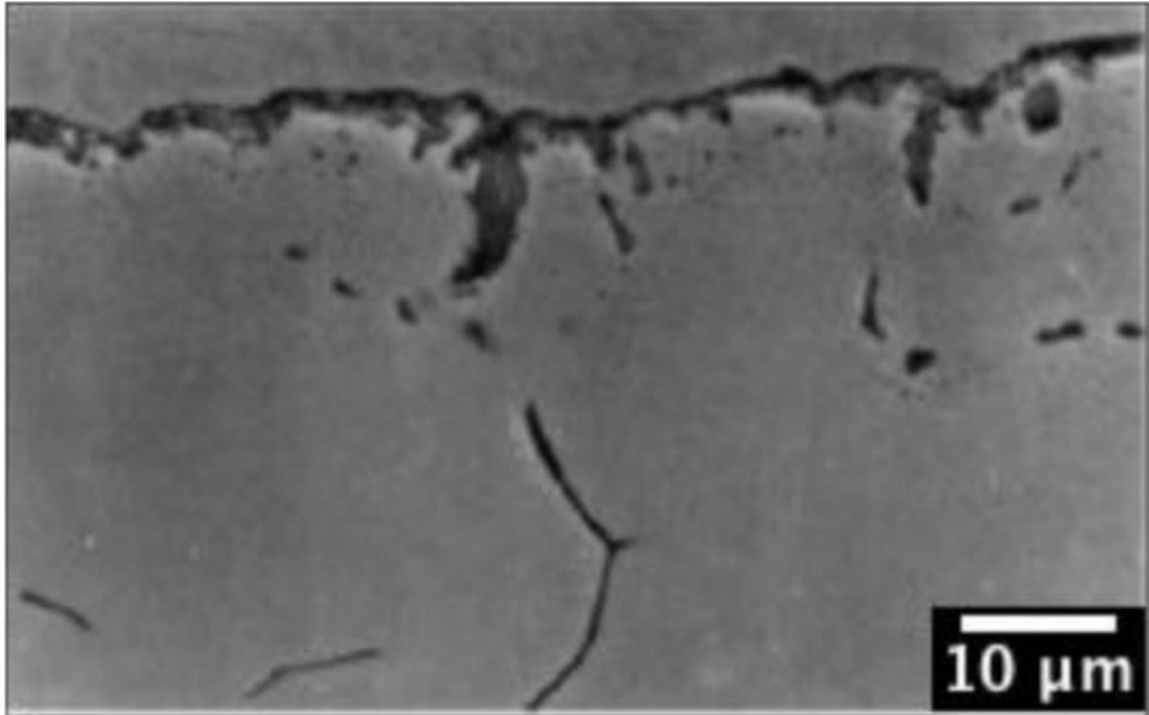


Figure 13: Micrographie par microscopie électronique à balayage d'un acier 20MnCr5 cémenté à pression atmosphérique révélant la présence d'oxydation intergranulaire.

Dans les années 70, la mise au point de traitement de cémentation à basse pression a permis de s'affranchir de l'oxydation intergranulaire.

Tableau 4: Moyen de contrôle du potentiel carbone en cémentation atmosphérique.

Méthodes	Descriptions
Spectrométrie IR	<p>L'analyseur à infrarouges permet de mesurer les teneurs en CO, CO₂ ou CH₄ d'une atmosphère. La détermination du potentiel carbone est rendue possible grâce à l'exploitation de la mesure des teneurs en CO et CO₂ et repose sur l'équilibre suivant :</p> $2\text{CO} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ <p>Avantages : analyse en continu de l'atmosphère par prélèvement gazeux, facilité d'étalonnage.</p> <p>Inconvénients : réactivité assez lente, prix.</p>

Sonde à oxygène	<p>Le principe de mesure du potentiel carbone par sonde à oxygène repose sur l'équilibre gazeux suivant :</p> $\text{CO} \leftrightarrow \text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ <p>Avantages : mesure in situ, bonne réactivité, bonne précision.</p> <p>Inconvénients : fragilité, complexité de mise en place de l'air de référence, dérive possible sans en avoir connaissance.</p>
Température de rosée	<p>L'équilibre essentiel sur lequel repose cette méthode est le suivant :</p> $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ <p>La teneur volumique en vapeur d'eau est mesurée à l'aide de la température de rosée selon la relation suivante :</p> $\% \text{H}_2\text{O} = \text{Exp}[19.33685422, 18 / (\text{TR} + 237,16)]$ <p>Connaissant la température de rosée, les teneurs en CO et H₂ accessibles par analyse IR, il est possible d'accéder au potentiel carbone.</p>
Fil résistif	<p>Elle repose sur la variation de résistivité d'un filament d'acier (à faible teneur en carbone) de diamètre très faible (0.06 mm) quand ce dernier s'enrichi en carbone. Pour une température donnée, la relation entre la teneur en carbone et la résistivité électrique est linéaire. La sensibilité de mesure s'étend de 0.1%C jusqu'à saturation du matériau du matériau constituant le filament.</p> <p>Avantage : détermination du potentiel carbone de l'atmosphère sans prélèvement de gaz, faible cout. Inconvénients : sensible aux suies et à l'oxydation, et fragile (sensible aux vibrations du four).</p>

Clinquant	La méthode repose sur la notion d'équilibre thermodynamique entre le carbone contenu dans le l'acier et l'atmosphère de cémentation. La détermination de la teneur en carbone d'un feuillard mince (clinquant) en acier C10 (XC10 norme AFNOR) placé dans le four correspond au potentiel carbone. Elle peut se faire soit par dosage chimique du carbone total, soit par pesée à l'aide d'une balance de précision (<0.1mg). Pour réduire les temps de mise à l'équilibre, l'épaisseur du clinquant est très fine (0.05 ou 0.1 mm).
-----------	--

c. Cémentation liquide

La cémentation liquide est une méthode de cémentation des pièces en acier ou en fer en les maintenant à une température supérieure à AC3 (la température à laquelle l'austénite commence à se former, généralement 980°C) dans un bain de sel fondu qui introduit du carbone et parfois de l'azote dans le métal. La diffusion ultérieure du carbone de la surface vers l'intérieur produit une couche qui peut généralement être durcie par trempe rapide à partir de la température du bain [24].

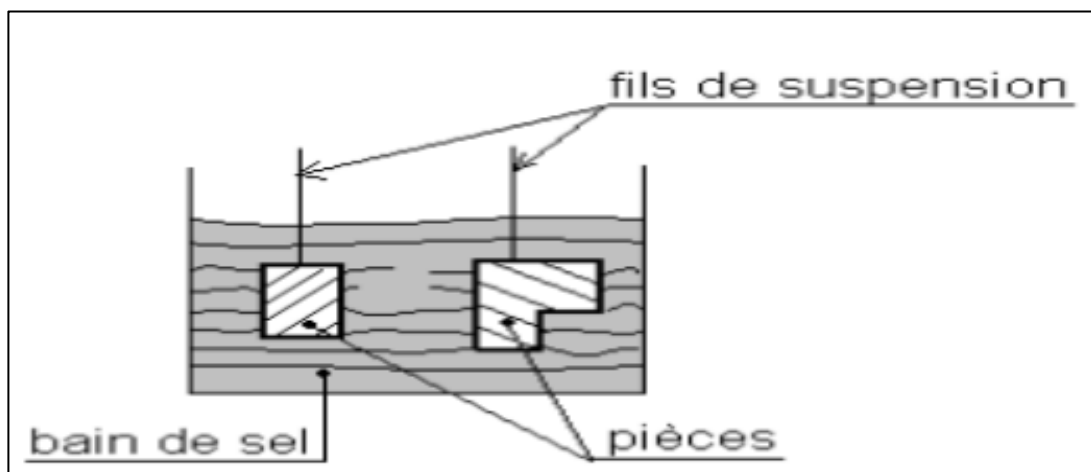
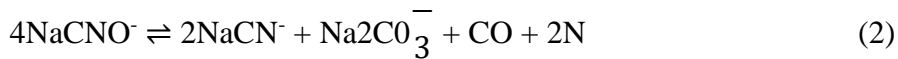


Figure 14: Représentation d'une cémentation liquide [25].

L'agent de cémentation actif dans un bain de sel est le cyanure de sodium (NaCN) ou le cyanure de potassium (KCN). On pense que la carburation se déroule selon les réactions suivantes :



La première réaction a lieu à l'interface entre le bain de sel et l'atmosphère et les deux autres réactions ont lieu à l'interface entre le bain de sel et l'acier. Une partie de l'azote libéré par la réaction (18) est également absorbée par l'acier.

Les bains de cyanure conventionnels qui donnent une profondeur de boîtier allant de 0 à 8 mm ont une teneur en cyanure (NaCN) de 40 à 50%.

Un bain de sel contenant environ 20% de NaCN peut être utilisé pour traiter des pièces très fines nécessitant une profondeur de boîtier de seulement quelques dixièmes de millimètre.

La surface du bain doit être recouverte d'une couche de fines de graphite qui empêche la perte de rayonnement et le dégagement de gaz du bain.

La quantité de carbone et d'azote captée par l'acier dépend principalement de la teneur en cyanure du bain et de sa température. La figure (15) montre que la concentration en carbone augmente tandis que l'azote diminue lorsque la teneur en cyanure augmente de 10 à 50%.

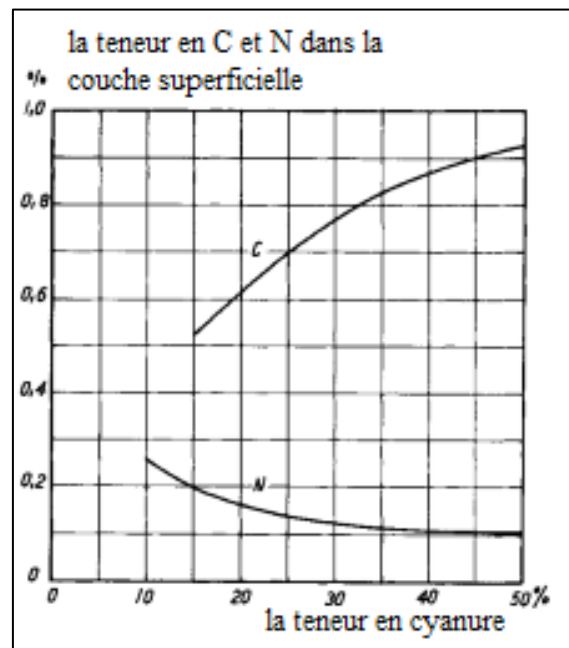


Figure 15: Concentrations de carbone et d'azote dans la surface en fonction de la teneur en NaCN lors de la cémentation d'acier au carbone non allié pendant 2 à 5 h à 950 ° C dans un bain de cémentation liquide sous un capot de protection en graphite [26] .

Avec l'augmentation de la température, la teneur en NaCN restant constante à environ 50%, la concentration de carbone augmente et celle d'azote diminue comme le montre la figure (16).

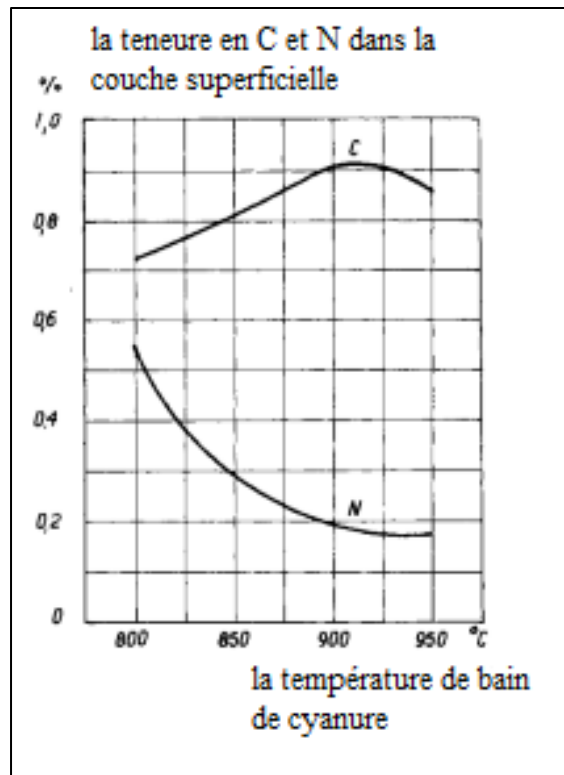


Figure 16: Concentrations de carbone et d'azote dans la surface en fonction de la température de cémentation lors de la cémentation d'acier au carbone non allié pendant 2 à 5 h dans un bain de NaCN à 50% [26].

La cémentation au bain de sel est principalement utilisée pour les petites pièces qui nécessitent généralement une profondeur de boîtier inférieure à 0-5 mm. Plus la profondeur de boîtier requise est petite, plus l'économie est réalisée en utilisant un bain de sel car la vitesse de chauffage est très élevée par rapport à celle des milieux de cémentation solides. Avant d'immerger les pièces dans le bain de sel, elles doivent être préchauffées entre 100 ° C et 400°C, en partie pour éliminer toute trace d'humidité et en partie pour utiliser plus efficacement la capacité du bain de sel [26].

Les avantages et les inconvénients

L'utilisation continue des bains de sel est due à l'uniformité du chauffage et aux taux de transfert de la chaleur élevés procurés par l'utilisation du sel comme milieu de chauffage. De plus, le moindre coût d'investissement initial, la flexibilité de fonctionnement et la facilité relative de contrôle du potentiel de carbone ont rendu ce type d'équipement adapté aux petites quantités de lots et aux fours à usage général dans la plupart des ateliers d'ingénierie.

Les principaux inconvénients des bains de sel sont :

- Les problèmes d'élimination posés par les effluents du procédé, qui contient du cyanure, un poison mortel.
- Difficultés de nettoyage de l'ouvrage traité.
- Sécurité générale (danger d'explosions, éclaboussures de sel, etc.).
- L'économie (consommation d'énergie élevée, plus le coût des sels) [24].

D. Les propriétés des couches cémentées

a. Profondeur de cémentation [27]

Une couche traitée est caractérisée par son profil de microdureté, Il permet de mesurer l'épaisseur efficace de la couche, appelée profondeur conventionnelle de cémentation. Elle est définie par la distance à la surface du point pour lequel la dureté a une valeur égale à 500 Hv, figure (17). La profondeur conventionnelle de cémentation dépend donc du profil de la teneur en carbone, du degré de transformation martensitique des divers points de la couche enrichie (la trempabilité des aciers), mais surtout des conditions du traitement (la température et la durée de la cémentation). L'épaisseur visée pour la couche cémentée varie selon la destination et le volume de la pièce. Les épaisseurs importantes (0.8 mm à 1.8 mm ou plus) sont réservées à des pièces devant résister à l'usure et des pièces de forte section. Pour les pièces moyennes de faibles sections, tels que les engrenages d'automobile, des épaisseurs de 0.2 mm à 0.8 mm peuvent être suffisantes.

Les aciers ayant des concentrations élevées en éléments gammagène (Si, Ni) augmentent la diffusivité du carbone dans l'austénite mais réduisent la cinétique de transfert du carbone à partir de l'atmosphère vers la surface de l'acier, par contre, les aciers avec des éléments carburigène (Cr, Mo) augmentent le coefficient de transfert de masse dans l'atmosphère en améliorant l'évolution du profil de carbone.

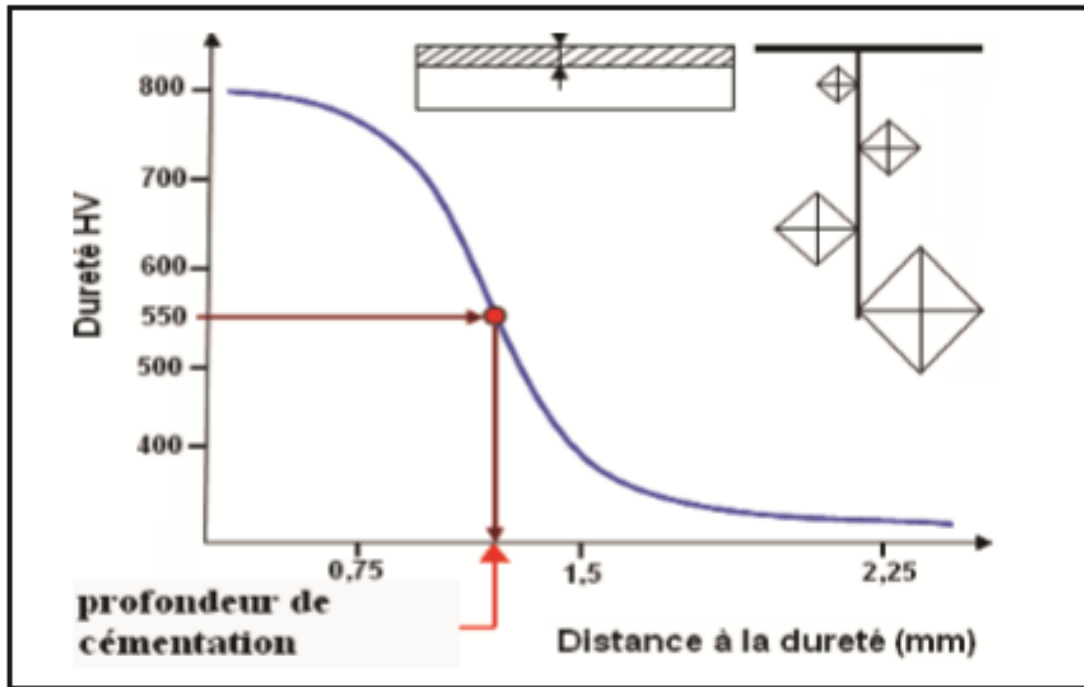


Figure 17: profondeur conventionnelle de cémentation.

b. La Dureté de la couche cémentée et la concentration du carbone en surface

La dureté maximale pour les aciers non alliés est obtenue lorsque la concentration en carbone est d'environ 0,8% C, comme le montre la figure (18). Au-dessus de cette concentration en carbone, la dureté diminue en raison d'une augmentation de la quantité d'austénite résiduelle. Par conséquent, la courbe de dureté montre souvent une diminution de la dureté près de la surface, où la concentration en carbone est plus élevée. Le carbone, l'azote et presque tous les éléments d'alliage abaissent la température M_s (La température à laquelle la transformation de l'austénite en martensite commence). Cela conduit à un gradient de concentration d'austénite résiduelle qui augmente vers la surface après la cémentation et la trempe. Pour compenser cet effet, la concentration de carbone de surface après la cémentation qui fournit une dureté de surface maximale doit être réduite tout en augmentant la teneur en alliage d'acier. Les éléments de formation de carbure, tels que le chrome et le molybdène, peuvent résister à cet effet et augmenter la concentration de carbone à la surface, qui fournit une dureté maximale.

En effet, la formation de carbures provoque une faible concentration en carbone dans l'austénite, bien que la concentration moyenne en carbone soit élevée. Le tableau (5) donne quelques exemples de la relation entre la dureté maximale et la concentration en carbone des différents types d'aciers. Les aciers alliés au Mo obtiennent la dureté de surface

la plus élevée et les aciers alliés au Ni la plus faible. Les aciers alliés au Mn-Cr obtiennent une dureté superficielle intermédiaire [28].

Tableau 5: la dureté maximale de la surface pour une Concentration de carbone de surface pour certains types d'aciers cémenté [28].

Principaux éléments d'alliage	La concentration du carbone % C	La dureté de surface HV
Ni (1-4%)	0.60-0.75	620 - 670
1.5%Cr, 2%Ni, 0.2%Mo	0.65-0.70	840
1.5Mn, 0.04%B	0.85	815
Mn - Cr	0.70	840
Mn - Cr	1.0	940

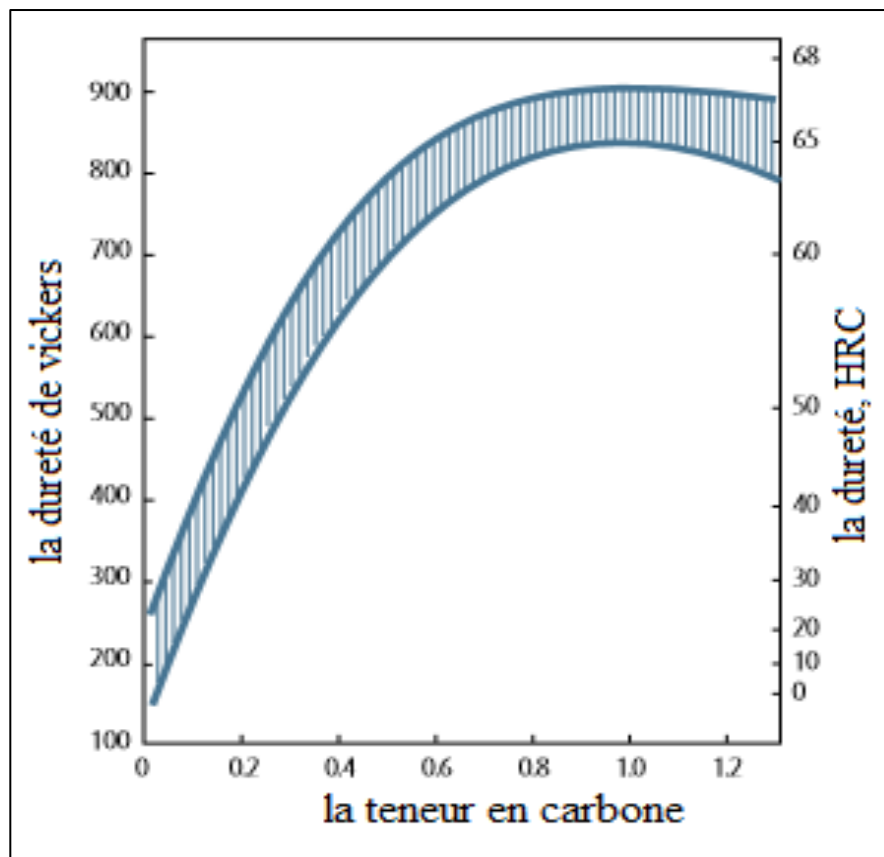


Figure 18: la Dureté en fonction de la teneur en carbone de l'acier cémentée. La zone ombrée montre l'effet de diffusion de la teneur en austénite et en alliage retenue de l'acier [28].

c. La Dureté du cœur

La dureté du cœur n'est pas affectée par le processus de cémentation lui-même, mais dépend uniquement du type d'acier et de sa teneur en carbone, de la trempabilité, des

dimensions des pièces et de l'intensité du durcissement. La meilleure résistance à la fatigue est obtenue pour les engrenages et les pièces sujettes à la fatigue par flexion avec une dureté de cœur de 400-450HV.

Il existe une interdépendance entre la couche cémentée et le cœur en ce qui concerne les contraintes résiduelles. L'amplitude des contraintes résiduelles de compression dans la couche diminue à mesure que la résistance du cœur augmente [28].

d. Structure

La couche durcie peut avoir une structure martensitique homogène et ne doit pas présenter de réseaux de carbures en surface, due à une teneur en carbone excessive localisée à certain joint de grain. La teneur en austénite résiduelle doit être ajustée.

On doit éviter le grossissement du grain à la température de cémentation et c'est pourquoi on utilise des aciers à grain fins. Les caractéristiques obtenues sous la couche cémentée dépendent essentiellement :

- ✓ De la nuance d'acier utilisé.
- ✓ Des conditions de refroidissement imposées à la pièce.
- ✓ De la taille de la pièce [29].

E. Les aciers de cémentation

Les aciers de cémentation, à faible teneur en carbone inférieure à 0,25%., permettent d'obtenir des pièces qui, après les usinages mécaniques et le traitement de cémentation, possèdent une haute dureté superficielle 62 HRC associée à une bonne ténacité à cœur (20 à 40) HRC [30] Grâce à la haute dureté de surface obtenue avec le traitement de cémentation, ces aciers sont utilisés pour réaliser tous les organes mécaniques exigeant une dureté de surface considérable comme les engrenages, les goujons, les bagues, les arbres et tout le matériel nécessaire pour à la transmission du mouvement.

Les éléments d'alliage sont présents dans les aciers de cémentation pour améliorer leur aptitude à subir la transformation martensitique (trempabilité). Plus l'acier est trempant et moins il est nécessaire de refroidir énergiquement une pièce pour obtenir la transformation martensitique. Tous les éléments d'alliage, à l'exception du cobalt, augmentent la trempabilité mais dans des proportions variables, ainsi le chrome, le manganèse et le molybdène qui intervient dans les aciers de cémentation apportent une forte augmentation de trempabilité [31].

a. Aciers alliés au chrome

La teneur en chrome des pièces simples, varie de 0,7 à 1 %, la profondeur de la couche cémentée atteint 1,5 mm. Une trempe à l'huile, suivie de cémentation, donne au cœur des pièces, une structure bainitique. Les propriétés mécaniques sont de l'ordre de :

- R = (700 à 800) N/mm².
- Re = (500 à 650) N/mm².
- A = (11 à 12) %.
- K = (60 à 70) J/cm².

b. Aciers alliés au chrome-vanadium

L'addition de vanadium (0,1 à 0,2) % à un acier au chrome, améliore ses propriétés mécaniques, celles-ci, deviennent au cœur.

- R = (750 à 800) N/mm².
- Re = (550 à 600) N/mm².
- A = (12 à 13) %.
- K = 80 J/cm².

La faible pénétration de trempe de ces aciers ne permet de les utiliser que pour des pièces de petites dimensions (axes de pistons, arbres à cames).

c. Aciers alliés au chrome-nickel

L'addition simultanée de chrome et de nickel augmente la résistance, la plasticité et la ductilité au cœur des pièces. De plus, le nickel augmente la résistance et la ductilité de la couche cémentée.

Ces aciers sont employés pour les grosses pièces supportant, en service, des charges dynamiques importantes. Ils sont peu susceptibles de surchauffe en cémentation prolongée et n'ont pas de tendance à la sursaturation en carbone de la couche superficielle. L'addition de tungstène ou de molybdène aux aciers au chrome-nickel, accroît la stabilité de l'austénite sur fusionnée et par conséquent, la pénétration de trempe.

d. Aciers alliés au chrome-manganèse

Dans beaucoup de cas, puisque les aciers au chrome-nickel coûtent chers, ils sont remplacés par les aciers au chrome-manganèse qui sont employés pour la fabrication des engrenages, des arbres, etc.

Les aciers alliés au chrome- manganèse sont moins résistants à la surchauffe et possèdent une ductilité plus faible par rapport aux aciers chrome-nickel. Une faible addition

de titane (0,03 à 0,09) % à cet acier donne après cémentation, trempe. Revenu, une couche cémentée de dureté élevée (60 HRC), une pénétration de trempe très faible, ainsi une faible addition de molybdène l'accroît et donne une dureté maximale en surface.

Dans le tableau (6) ci-dessous, nous avons porté les principales nuances d'aciers alliés de cémentation et leurs applications.

Tableau 6: les principales nuances d'aciers alliés de cémentation et leurs applications [13].

Nuance DIN	Rm (daN/mm ²)	Dureté (HB)	Applications Technologiques
13Cr3	50 à 60	141 à 183	Pièces de construction avec exigences extraordinaires, résistance du cœur très élevée, haute résistance à l'usure : vis sans fin, engrenages...
15CrNi6	60 à 75	169 à 211	
18CrNi8	60 à 80	183 à 225	
15CrMo5	60 à 75	169 à 211	Pièces soumises à des efforts élevés de tous genre : roues dentées, engrenages de boîtes de vitesses, arbres à cames
20CrMo5	75	220	
16MnCr5	60 à 70	155 à 200	
20MnCr5	60 à 75	169 à 211	
18NiCrMo6	115 à 150	210	Axes, engrenages, pignons, leviers de direction

Chapitre II

Les traitements thermiques des aciers cémentés

II. Les traitements thermiques des aciers cémentés**II.1. Définition**

La cémentation ne durcit pas l'acier. Il ajoute du carbone aux couches extérieures d'acier. Lors de la cémentation à 900–930 ° C, une surchauffe peut se produire à la fois dans le cœur et le revêtement extérieur de l'acier en raison de la nature prolongée des opérations. Cela peut provoquer un grossissement du grain sur toute la section transversale. Par conséquent, dans la plupart des cas, Quelle que soit la méthode de cémentation, les pièces cémentées doivent subir un certain traitement thermique pour les raisons suivantes :

- ✓ Pour produire une surface dure qui résiste à l'usure et possède une résistance aux chocs plus élevée.
- ✓ Du fait de leur maintien prolongé à température élevée pendant la cémentation, la partie interne des pièces en acier ordinaire au carbone acquiert également une structure à gros grains, ce qui doit être reflété après la cémentation.
- ✓ La couche cémentée peut contenir un excès de cémentite sous forme de treillis, ce qui conduit à une fragilité conduisant à des fissures lors du broyage.

Le traitement thermique ultérieur du composant cémenté varie en fonction du type de composant et de la gravité de l'état qui doit être rencontrée en service. Dans les cas où l'acier est intrinsèquement à grain fin, la pièce à usiner est chauffée au-dessus de la température Ac1 et directement trempée. Si l'acier présente un grain grossier sur toute la section transversale, un double traitement thermique peut être nécessaire pour améliorer les propriétés de la couche et du cœur. Dans de tels cas, l'acier est d'abord chauffé au-dessus de la température Ac3 (900 ° C) et normalisé pour affiner la granulométrie du cœur. L'avantage supplémentaire de cette étape est que le réseau de carbure fond également lors du chauffage et n'apparaît pas après la trempe. La deuxième étape du traitement thermique consiste à chauffer la pièce au-dessus de la température Ac1 (760–780 ° C), suivi d'une trempe. Le raffinage et le durcissement de la couche sont obtenus par le deuxième traitement thermique. Lors de la trempe, l'austénite se transforme en martensite à la surface de l'acier. Le cœur ne durcit pas lors du deuxième traitement thermique et reste à grain fin et résistant.

En fait, dans tous les cas, l'opération finale de traitement thermique des pièces cémentées est un revenu à environ 160-180 ° C. Lorsque les aciers fortement alliés sont cémentés, un problème survient en raison de la rétention de l'austénite. Cela réduit fortement la dureté. Un traitement inférieur à zéro peut être appliqué à ces aciers pour convertir l'austénite conservée en martensite [2].

II.2. La trempe

La trempe d'une pièce cémentée est obtenue en la refroidissant à une vitesse qui produit l'état métallurgique souhaité au niveau ou à l'intérieur des zones les plus sollicitées de la pièce. La trempe de l'acier cémenté se situe toujours entre le durcissement normal du cœur (comme l'acier avec une limite de teneur en carbone) et le durcissement de la couche superficielle (comme l'acier avec une limite de teneur en carbone différente). Conformément à l'acier de composition appropriée, il est possible d'obtenir des bonnes propriétés du cœur et de la couche, Sur demande, ces propriétés peuvent être modifiées dans de petites limites. Lors de la cémentation, les types de trempe suivants peuvent être réalisés [32] :

- ✓ La trempe directe depuis la température de cémentation.
- ✓ La trempe simple avec nouveau chauffage après cimentation.
- ✓ Double trempe.
- ✓ La trempe isotherme.

Les techniques les plus utilisées sont la trempe directe et la trempe au réchauffage (simple). La trempe à double réchauffage était courante avant l'introduction du contrôle de la taille des grains, mais il est maintenant moins utilisé, même si certains considèrent qu'il est capable de produire des ingrédients très durables. Lorsque des cycles de production élevés sont impliqués, une trempe directe à partir de la température de cémentation ou une trempe unique à partir d'environ la température AC_{cm} est courante. La trempe par réchauffage nécessite que les pièces soient refroidies, plutôt que trempées, après la cémentation, puis une trempe à un stade ultérieur. Cette méthode est de préférence utilisée pour les nuances d'acier cémentées plus alliées et dans les cas des traitements thermiques contenant une ou quelques pièces. Il y a plusieurs raisons d'utiliser cette méthode de trempe :

- ✓ Pour garantir la qualité métallurgique, par exemple, la granulométrie et le contrôle de l'austénite résiduelle.
- ✓ Lorsqu'un traitement thermique sous-critique intermédiaire est nécessaire, soit pour conditionner les carbures à l'intérieur de la couche, soit pour faciliter un usinage supplémentaire.
- ✓ Lorsqu'il n'est pas possible d'effectuer une trempe directe (comme dans la cémentation solide).

Avec un faible travail de production, la trempabilité de l'acier peut ne pas être suffisante pour la pièce à usiner, Il y a une tendance à la sécurité en choisissant un acier d'une trempabilité supérieure à la trempabilité minimale requise [33].

II.2.1. Trempe directe

Elle consiste en un refroidissement à partir de la température de cémentation Dans un milieu adapté (dans l'huile ou l'eau).

Cette méthode est économiquement avantageuse, notamment lors de la cémentation dans des bains de sel ou dans une atmosphère gazeuse.

En automatisant le processus, ce procédé est utilisé comme une opération finale utilisant des longs fours continus, dans lesquels la température, avant l'immersion dans le milieu de trempage peut être réduite à une température appropriée pour la trempage du cœur.

L'avantage du procédé est que le cœur est complètement durci et a obtenu la dureté correspondante. La couche cémentée est trempée par surchauffe, tandis qu'une petite quantité de cémentite reste dans un état structurellement libre. Si le durcissement des aciers fortement alliés est effectué de la même manière, une grande quantité d'austénite résiduelle reste dans leur structure.

Après la trempage directe, les pièces se déforment moins que dans les processus plus complexes, On voit que la déformation au cœur est plus faible si on utilise un mode dans lequel la température est abaissée de la température de cémentation à des températures comprises entre AC_1 et AC_3 par exemple $830^\circ C$), après quoi la trempage est effectuée.

La trempage directe des aciers au carbone est utilisée lorsqu'une certaine qualité de la couche de ciment n'est pas requise. Avec cette méthode de trempage, les aciers de qualité faiblement alliés, s'ils sont suffisamment fins et cémentés dans des bains de sel ou dans des atmosphères gazeuses, donnent de bons résultats.

La trempage directe peut également être isotherme dans un bain de sel. Cette dernière méthode est utilisée pour les pièces à parois minces et pour les pièces à surface inégale.

Dans certains cas, après la trempage directe, le refroidissement peut être effectué à une température négative (pour la décomposition de l'austénite résiduelle) [32].

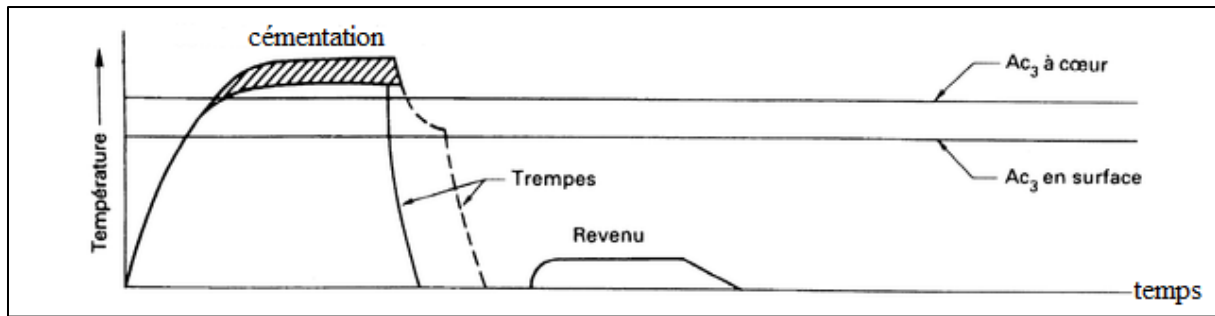


Figure 19: cycle de cémentation pour la trempe directe [34].

II.2.2. La trempe sous zéro [35]

Un refroidissement en dessous de zéro est appliqué aux couches cémentées qui sont sensibles à la rétention d'austénite et également pour augmenter la dureté et la résistance à l'usure des composants.

Les pièces de précision, les engrenages de haute précision et les broches en aciers alliés de cémentation peuvent contenir de l'austénite résiduelle pendant la cémentation.

La présence d'austénite résiduelle dans la couche réduit la dureté maximale atteignable et entraîne progressivement des changements dimensionnels sur les pièces, Parce que l'austénite préservée continue de se transformer lentement en martensite à une température ambiante pendant longtemps après le processus de durcissement. Les composants subissent un traitement sous zéro pour éviter des changements dimensionnels ultérieurs et d'atteindre une dureté maximale.

Le traitement sous zéro doit être effectué immédiatement après la cémentation des composants « maintien prolongé à une température ambiante » après le traitement, L'austénite va se stabiliser.

Par conséquent, la procédure de traitement thermique suivante doit être adoptée dans l'ordre indiqué (Figure 20) :

1. carburé.
2. Durcir.
3. Traitement sous zéro (-70 à -100 °C).
4. Revenu (150 à 180 °C).

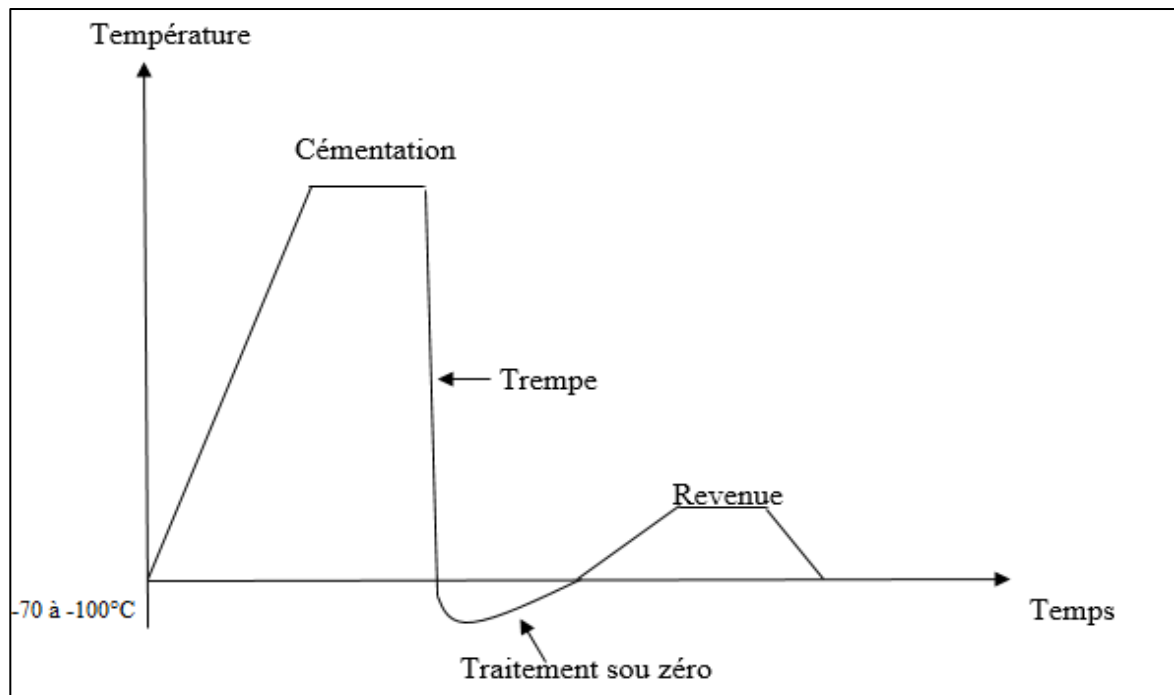


Figure 20: procédé de la trempe sou zéro [35].

II.2.3. La trempe simple

La trempe simple avec chauffage après cémentation présente certains avantages par rapport à la trempe directe.

Il est important de savoir de quelle manière la pièce se refroidit après la cémentation. Les produits peuvent être refroidis dans des caisses à air ou dans un four et à l'air après avoir retiré les pièces des milieux de cémentation.

A. La trempe simple sans raffinement de cœur

Cette méthode de trempe ne réduit pas la granulométrie du cœur, il reste doux et riche en ferrite, la couche cémentée est normalement durcie et contient de la martensite à petits angles avec une quantité minimale d'austénite résiduelle.

Les pièces qui sont cémentées par agent solide, sont d'abord laissées à refroidir dans la boîte et ensuite chauffées à une température nécessaire au durcissement (trempe). Après chauffage (juste au-dessus de la température AC_1 (750-780 ° C), ils sont trempés dans un bain d'eau, d'huile ou de sel. Lors de la trempe à partir d'une telle température, la zone extérieure sera durcie et le cœur sera partiellement affiné. Cela évite la surchauffe de la couche superficielle et réduit la distorsion. Ainsi, ce procédé est plus adapté au traitement des pièces de formes complexes. Cette méthode peut également être adoptée pour les pièces qui sont cémentées dans un bain de sel, dont la profondeur de boîtier dépasse 0,5 mm avec 0,8% à 1,0% de potentiel de carbone, Si les pièces sont trempées dans le bain de cémentation, cela

peut entraîner une dureté superficielle plus faible en raison de la présence d'austénite résiduelle résultant d'une teneur élevée en carbone superficiel.

La trempe à basse température, après refroidissement par air, entraîne une dureté plus élevée (figure 21). La quantité d'austénite retenue peut être encore réduite par un traitement sous zéro [35].

B. La trempe simple avec raffinement de cœur [32]

C'est une trempe à une température supérieure à AC_3 pour le raffinement du cœur. Lorsque la pièce est chauffée, la température normale de durcissement du cœur est atteinte, et la couche superficielle est trempée par surchauffe, ce qui a pour résultat une structure de martensite aciculaire grossière. Le cœur obtient la plus haute résistance et dureté possible. Si elle est utilisée sur des aciers alliés présentant des tendances de durcissement marquées, la température de trempe élevée favorise la rétention de l'austénite en raison de la présence d'une proportion relativement élevée d'éléments d'alliage. Cela peut entraîner une certaine réduction de la dureté de la couche. Au contraire, la couche est influencée par une grande quantité des résidus. L'austénite s'avère un peu plus tendre que d'habitude (cela concerne principalement les aciers alliés au nickel). Si la couche est légèrement cémentée, la cémentite à l'état structurellement libre ne précipite pas.

Cette méthode est largement utilisée pour les engrenages automobiles, et dans les cas où une plus grande résistance et un grain précis sont nécessaires dans le cœur, spécialement requis pour les services lourds. La résistance aux chocs du cœur dépend de la composition de l'acier et de la teneur en carbone qu'il contient. Le grain de la couche superficielle est un peu grossier, elle est plus sensible au broyage, c'est pourquoi la trempe à une température supérieure à AC_3 n'est utilisée que dans certains cas.

La trempe simple avec raffinement du cœur est de plus en plus préférée aux autres méthodes parce que les propriétés mécaniques du cœur sont égales à celles produites par une opération de double trempe.

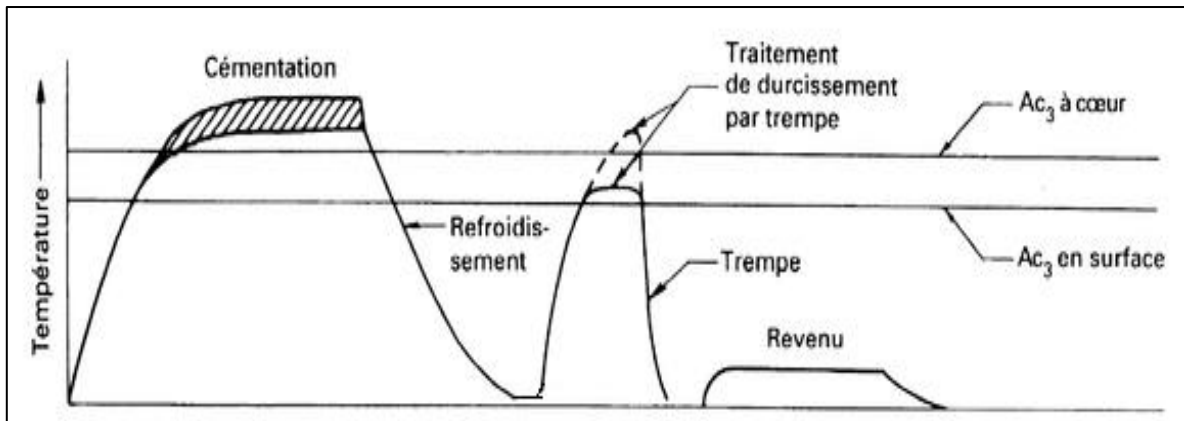


Figure 21: cycle de cémentation pour la trempe simple (avec et sans raffinement de cœur) [34].

C. La trempe simple avec recuit intermédiaire

Pour les produits soumis à l'usinage, après cémentation, les pièces sont recuites à 650 à 670°C. La couche cémentée est usinée dans des zones où d'autres opérations telles que le fraisage, le perçage, etc. doivent être effectuées après la trempe. Les pièces recuites sont ensuite chauffées à la température de trempage requise pour obtenir la dureté souhaitée sur la zone cémentée et la ténacité requise sur le cœur, maintenant, les opérations telles que le brochage et le perçage peuvent être facilement effectuées sur le cœur (Figure 22) [36].

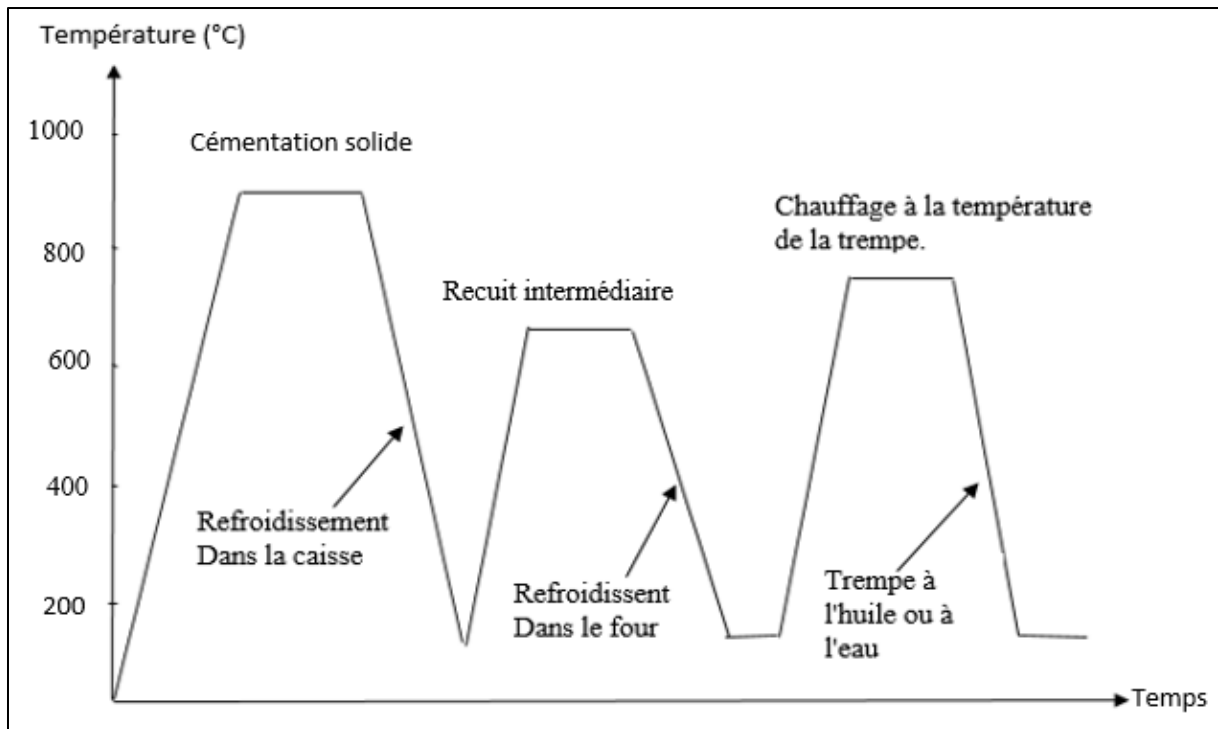


Figure 22: Cycle de cémentation pour la trempe simple avec recuit intermédiaire [36].

D. La trempe simple après transformation isotherme

Cette méthode peut être appliquée à la carburation en bain de sel lorsque la profondeur du boîtier dépasse 0,8 mm. Le produit est placé dans un bain de sel pour la transformation isotherme. Il est ensuite chauffé à nouveau à la température de trempe, trempé dans l'huile et ensuite revenu, C'est une procédure qui prend beaucoup de temps et qui est à peine utilisée aujourd'hui [37].

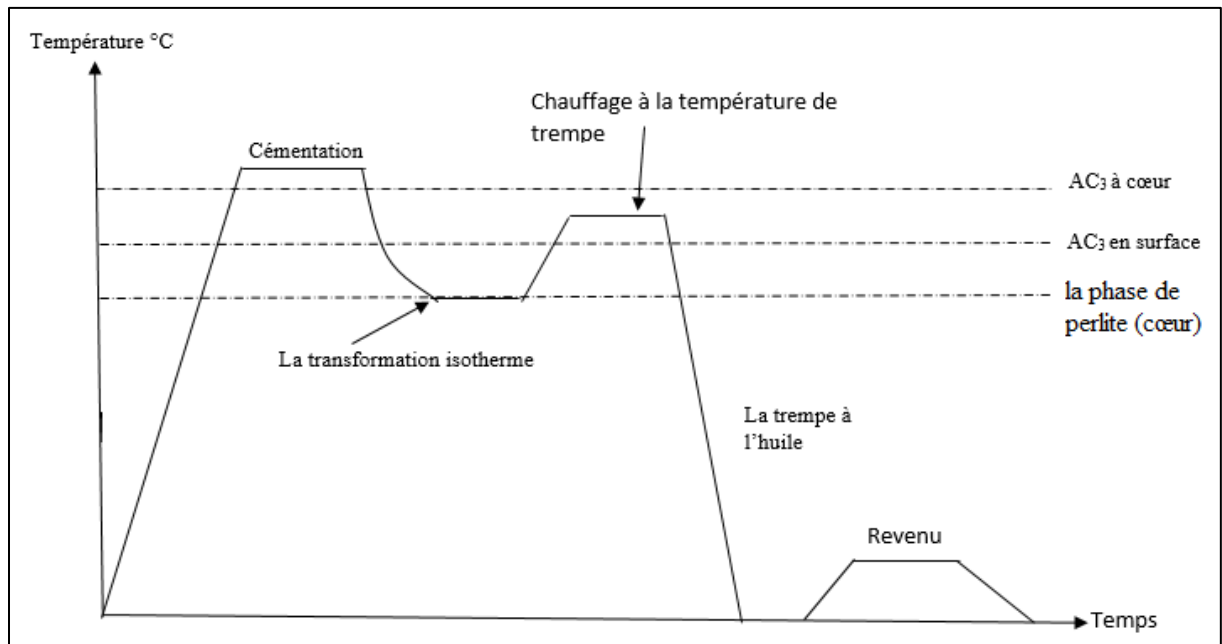


Figure 23: Cycle de cémentation avec transformation isotherme et trempe simple [37].

II.2.4. Double trempe [38]

La figure (24) prévoit l'utilisation d'un double durcissement suivi d'un revenu à basse température. La première trempe dans un tel complexe technologique est réalisée avec un chauffage à des températures de 860 à 880 ° C et un refroidissement à l'huile. Que ce soit pour les aciers alliés ou les aciers au carbone. La deuxième trempe (finale) est réalisée à partir d'une température de 760–800 ° C. pour les aciers au carbone le refroidissement est réalisé dans l'eau, et pour les aciers alliés il est réalisé dans l'huile.

Dans ce cas, la première trempe assure le raffinement du grain et la formation d'un complexe élevé des propriétés mécaniques au cœur de la pièce, et la deuxième forme finalement une dureté superficielle et une résistance à l'usure élevées de la pièce. L'opération finale de traitement thermique est un revenu à basse température.

L'utilisation d'huile comme milieu de refroidissement, y compris pour les aciers au carbone, est due au fait qu'il n'est pas nécessaire d'obtenir des structures martensitiques dans l'acier après la première trempe. En outre, la décomposition diffusionnelle de l'austénite surfondue lors d'un tel refroidissement est souhaitable, puisque cette transformation affine davantage la formation de la structure des grains, réduit le degré d'alliage des solutions solides, réduisant la quantité d'austénite résiduelle après la trempe finale.

Pour les aciers fortement alliés, la double trempe n'est généralement pas utilisée. Cette méthode est recommandée pour les pièces simples. Dont la qualité dépend des bonnes propriétés du cœur et de la couche. L'inconvénient de ce procédé est qu'il conduit à un changement dimensionnel plus important que dans le cas de la trempe simple. Pour ces raisons, la double trempe n'a pas beaucoup de valeur pratique.

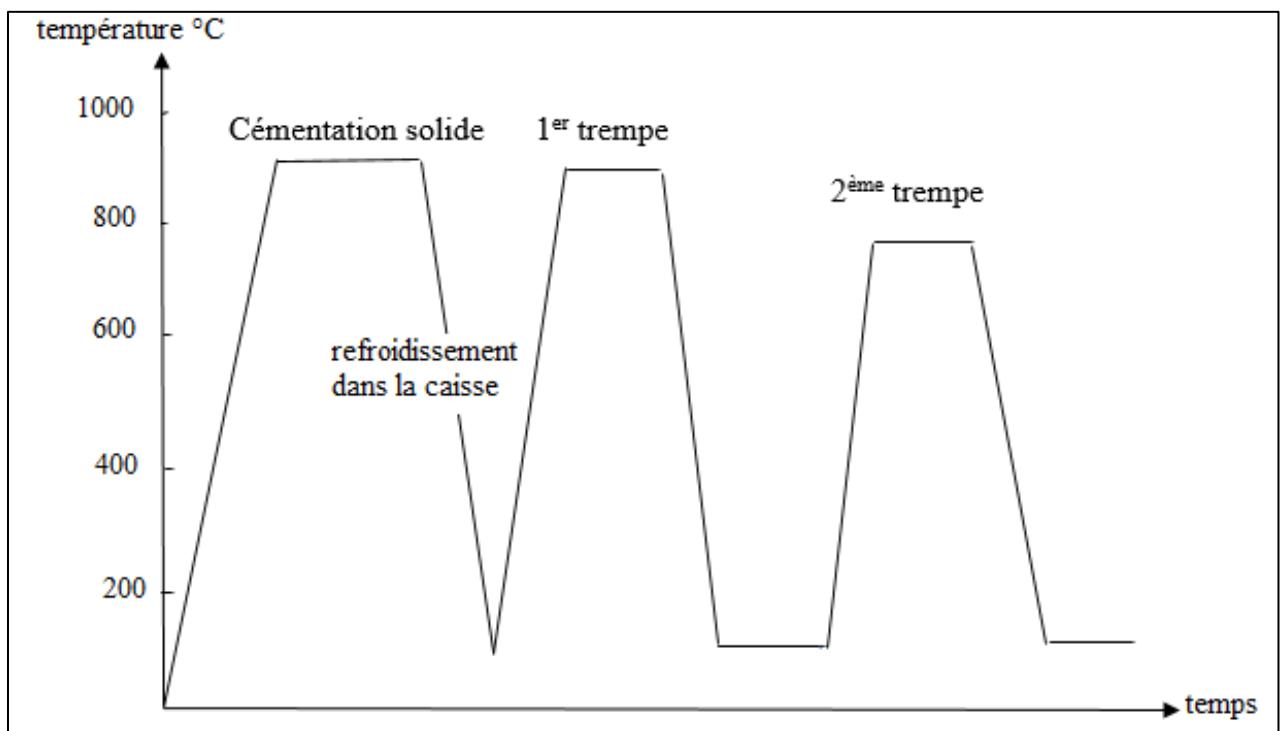


Figure 24: Cycle de cémentation pour la double trempe.

II.2.5. La trempe isotherme [32]

La trempe isotherme est utilisée dans les cas où la couche cémentée est directement trempée en martensite après la cémentation ou un nouveau chauffage, et il est nécessaire de connaître la température M_s de la couche et la position de l'extrémité la plus éloignée du début de la courbe de désintégration.

La trempe isotherme est utilisée pour les aciers au carbone et alliés. Lorsque les pièces ne sont pas de taille trop grande (leur refroidissement du cœur se produit avec une décomposition partielle de l'austénite), à la suite d'une trempe isotherme, de la martensite apparaît si la température initiale dépasse le point AC_3 . Dans des grandes parties du cœur, en plus de la martensite, ainsi que de la ferrite, des structures de décomposition apparaissent, correspondant à des températures plus élevées.

La trempe isotherme est souvent utilisée, notamment pour les pièces complexes (pièces de machines, voitures, etc.). Ce procédé est combiné avec succès avec la cémentation dans les bains de sel ou seulement avec le chauffage dans ces bains pour une transformation isotherme.

La trempe isotherme, limitée par la forme et la taille, est utilisée pour les aciers au carbone à grains fins qui ont tendance à former des taches molles, Pour les aciers nitrocémentés, la trempe isotherme est utilisée avec succès car la courbe en forme de C de la couche est décalée sous l'influence de l'azote.

II.3. Le revenu

Généralement, le revenu des aciers peut être effectué à n'importe quelle température jusqu'à environ 700 °C (1290 °F), Cette gamme est divisée en deux gammes plus spécifiques : le revenu à basse température (jusqu'à -300 °C), qui modifie les caractéristiques de la structure trempée, et le revenu à haute température (-550 à 700 °C), qui élimine de nombreuses caractéristiques de la structure trempée. En ce qui concerne les aciers cémentés, le revenu à haute température n'est important que si un adoucissement suffisant doit être induit pour faciliter une opération d'usinage intermédiaire, ou comme préparation à une trempe de réchauffage. Le revenu à basse température, par contre, a plus d'importance car il affecte directement les propriétés de la pièce finie.

Après les opérations de carburation et de trempe, les composants sont généralement chauffés entre 140 et 250°C (Plus précisément, dans la gamme de 150 à 200 ° C), et maintenus à température entre 2 et 10 h. Cette opération de revenu rend généralement les composants plus aptes aux opérations de fabrication ultérieures, plus stables structurellement et dimensionnellement.

Les propriétés de dureté et de résistance du cœur sont peu affectées par le revenu, bien que la limite d'élasticité soit augmentée [33].

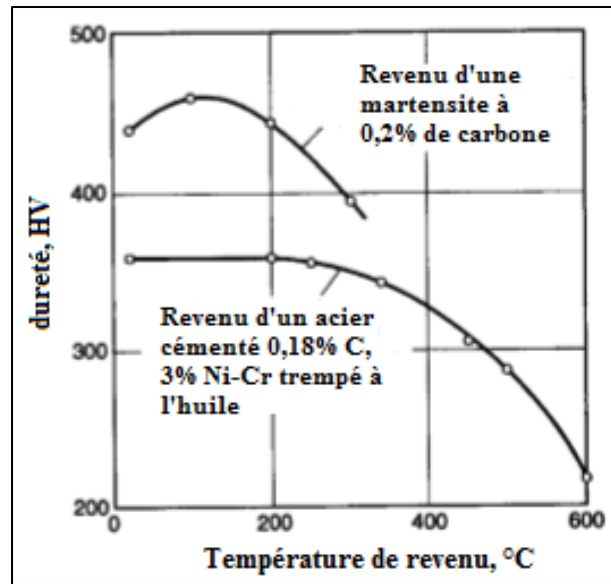


Figure 25: Effet du revenu sur la dureté du cœur [33].

II.4. Les propriétés mécaniques des aciers cémentés après traitement thermique

II.4.1. L'usure

L'usure est généralement définie comme la détérioration indésirable d'un composant par le retrait de matière de sa surface. Cela se produit par déplacement et détachement des particules de la surface. Les propriétés mécaniques de l'acier sont fortement réduites en raison de l'usure. L'usure du matériau peut être due au frottement des métaux les uns contre les autres, à l'effet d'érosion des milieux liquides et gazeux, au grattage des particules solides de la surface et à d'autres phénomènes de surface. Dans les essais en laboratoire, l'usure est généralement déterminée par la perte de poids dans un matériau et la résistance à l'usure est caractérisée par la perte de poids par unité de surface par unité de temps [39].

En termes d'ingénierie, l'usure est souvent classée comme légère ou sévère. L'usure légère est ce que les ingénieurs s'efforcent d'obtenir en créant des surfaces de contact de forme et de topographie appropriées. Le choix de matériaux et de traitements de surface adéquats est également nécessaire pour obtenir des conditions d'usure légère. Cependant, la lubrification de la surface est souvent le facteur le plus important pour garantir des conditions d'usure légère. Parfois, une usure sévère peut se produire, produisant des surfaces rugueuses ou rayées, une usure sévère est généralement inacceptable sur les machines hautes performances. L'usure peut également être classée en fonction des mécanismes d'usure fondamentaux impliqués [40].

A. Mécanismes d'usure

Une liste non exhaustive de mécanismes d'usure peut être dressée. Ces phénomènes, repérés dans des cas différents de contacts, peuvent en théorie s'appliquer tous en même temps, certains étant prépondérants par rapport à d'autres en fonction des conditions imposées [41]. Les mécanismes d'usure décrits dans la littérature sont l'usure adhésive, l'usure abrasive, l'usure corrosive, l'usure par érosion et l'usure par fatigue de surface. L'importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie est présentée sur la figure (26).

Le contrôle de l'usure est obtenu en modifiant les propriétés de la surface. Cependant, la modification de surface visant à réduire un type d'usure particulier ne rend pas nécessairement la surface insensible aux attaques d'autres types d'usure [42].

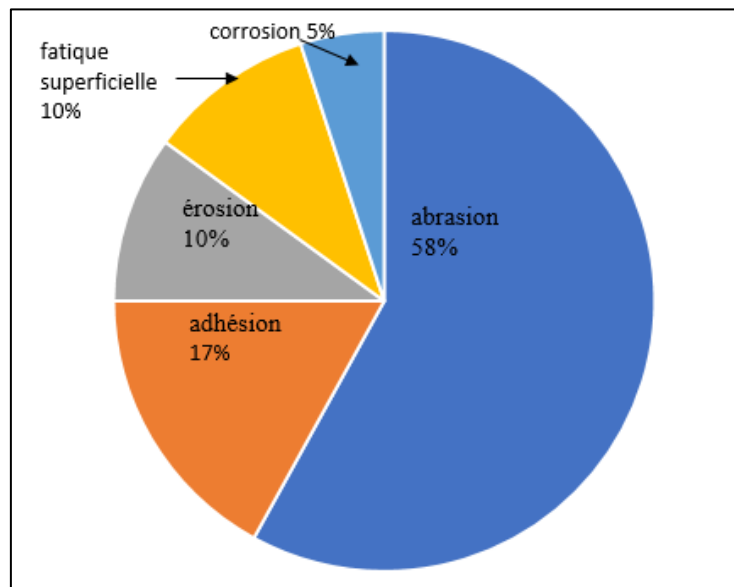


Figure 26: L'importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie [43].

a. Usure par abrasion

L'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière, produite par des particules dures ou des protubérances dures. Les particules dures peuvent se trouver encastrées dans l'une des surfaces (voir Figure 27 a) ou être entre les deux surfaces en mouvement relatif (voir Figure 27 b).

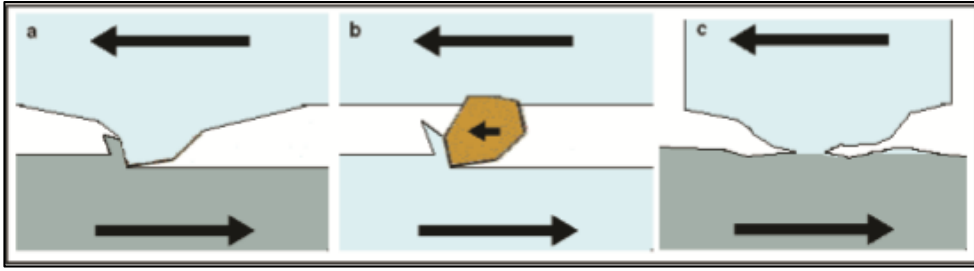


Figure 27: Mécanisme d'usure abrasive à deux corps et d'usure abrasive à trois corps.

Les surfaces endommagées par abrasion présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement. L'usure est assez constante au cours du temps, le volume des débris croît linéairement avec la charge appliquée et la distance parcourue.

La perte de matière dépend à la fois du matériau utilisé et de l'antagoniste, et l'aspect des sillons fournit de précieuses indications :

- ✓ S'ils sont brillants et très peu profonds, les aspérités de la pièce antagoniste ont raclé les couches d'oxydes.
- ✓ S'ils sont isolés, et brusquement interrompus, des particules dures introduites entre les surfaces sont plus ou moins incrustées.
- ✓ S'ils sont interrompus et rayent la pièce dure, des particules abrasives sont enchâssées dans la pièce tendre.
- ✓ S'ils sont interrompus et marquent la pièce tendre, la pièce antagoniste plus dure est trop rugueuse.

La dureté et la ductilité d'un matériau jouent un rôle important sur sa résistance à l'usure abrasive. Pour créer un sillon ou une rainure, il suffit que la dureté de l'antagoniste soit seulement de 20 % supérieure à celle de la surface rayée. Quant à la ductilité, elle caractérise l'aptitude du matériau à se déformer sans décohésion c'est à dire sans émission des débris.

Mais bien d'autres paramètres jouent un rôle et l'abrasion est un processus dans lequel interviennent la géométrie des pièces en contact, la topographie de leurs surfaces (hauteur et forme des rugosités), les caractéristiques mécaniques et métallurgiques des matériaux (fragilité, élasticité, plasticité...), les caractéristiques physico-chimiques résultant de l'environnement [44].

b. Usure par adhésion

Elle se produit par un transfert de matière de l'un des solides sur l'autre. Elle résulte de la formation des micro-jonctions entre les surfaces et la création des micro-ruptures. Les aspérités des surfaces en contact sont soumises à des contraintes locales élevées et subissent des déformations élastiques et plastiques qui provoquent un rapprochement des atomes et la création des liaisons interfaciales. Ces dernières peuvent être de nature adhésive lorsque l'interface est maintenue (matériaux non métalliques) ou cohésive lorsque l'interface disparaît suite aux mécanismes diffusionnels qui résultent de l'absence ou de la rupture des films superficiels. Le grippage peut avoir lieu si les aspérités de contact ne peuvent plus être cisailées (voir Figure 27 c) [45].

c. Usure par érosion

Elle est produite par l'impact de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux. Celles-ci provoquent une perte de matière. L'usure érosive se manifeste par des fissures et des éclats microscopiques dans le cas des matériaux fragiles et par des piqûres ou des rayures dans le cas des matériaux ductiles ou alors par du polissage [45].

d. Usure par fatigue de surface

Il y a formation de fissures dans les matériaux en présence, sous l'effet de gradients de contraintes cycliques. Les fissures se propagent vers la surface et il y a détachement de « grosses » particules dont la taille peut atteindre le millimètre.

On parlera particulièrement d'égrènement lorsqu'il y a formation de trous correspondant à la microstructure initiale des matériaux. Il y a « déchaussement » au niveau des joints de grains d'un métal par exemple.

On parle de délamination lorsque les déformations plastiques répétées des premiers corps conduisent à des fissures en sous-surface, parallèles à la surface. Il y a propagation des fissures le long du plan de cisaillement maximum.

Malgré une somme importante de travaux sur l'usure, peu d'entre eux abordent le problème dans sa globalité [46].

e. Usure par corrosion

Si on parle de la corrosion on parle aussi de l'oxydation, qui est en général un problème de réaction chimique entre la surface d'un matériau et l'environnement lors du

frottement à température élevée dans la zone de contact, donc la corrosion est la modification des surfaces due à cette réaction [47].

II.4.2. La Fatigue

Les défaillances de fatigue se produisent en raison de l'application des contraintes fluctuantes qui sont beaucoup plus faibles que la contrainte nécessaire pour provoquer une rupture lors d'une seule application de contrainte. La fatigue est la principale cause de défaillance et représente environ 90% de toutes les défaillances métalliques. La fatigue est un problème qui peut affecter n'importe quelle pièce ou composant en mouvement. Essieux de véhicules automobiles, vilebrequin, arbres de machine, ailes d'aéronef et les turbines terrestres sont tous sujets à des pannes de fatigue [48].

Les étapes principales de la fatigue sont :

- ✓ Amorçage de fissures.
- ✓ Propagation des fissures.
 - Elle suit d'abord approximativement le plan de scission maximale. La vitesse de propagation est alors très faible. Les défauts ne sont décelables qu'au laboratoire.
 - Puis elle suit le plan perpendiculaire à la contrainte de tension maximale. La vitesse de propagation s'accélère. Pendant cette période, les contrôles décèlent la fissure.
- ✓ La rupture finale [49].

La résistance à la fatigue des métaux augmente avec la diminution de la taille des grains. La durée de vie en fatigue est influencée par la composition chimique, la granulométrie et la quantité de travail à froid sur le métal. La résistance à la fatigue est la plus élevée à basse température et diminue graduellement avec l'augmentation de la température. Pour une meilleure résistance à la fatigue, le métal doit être à basse température.

Un autre moyen d'améliorer la résistance à la fatigue est le traitement thermique de trempe. Ce traitement appliqué localement sur la couche superficielle augmente sensiblement leur résistance à la fatigue. Une augmentation supplémentaire de la résistance peut être obtenue par des traitements thermo-chimiques tels que la cémentation [50].

La raison de la grande résistance à la fatigue de l'acier cémenté et trempé est une dureté élevée et des contraintes de compression résiduelles près de la surface. La microstructure prévue près de la surface de l'acier cémenté est la martensite avec une certaine quantité d'austénite retenue. Mais en général, l'oxydation interne d'éléments d'aciers

faiblement alliés comme Cr, Mn et Si pendant la cémentation provoque la réduction locale de la trempabilité et conduit à une microstructure non martensitique près de la surface. Ces défauts structurels sont des défauts de surface de l'acier cémenté et ne peuvent pas être suffisamment évités pendant le processus de cémentation industrielle.

L'acier cémenté avec des défauts structurels de la surface a une résistance inférieure à celui sans défauts structurels. On sait également que la résistance à la fatigue de l'acier cémenté dépend de la profondeur des défauts de la structure [51].

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 $6 \div 10 \mu\text{m}$; 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 $1080 \div 1240 \text{ MPa}$.
- ✓ 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 [12].

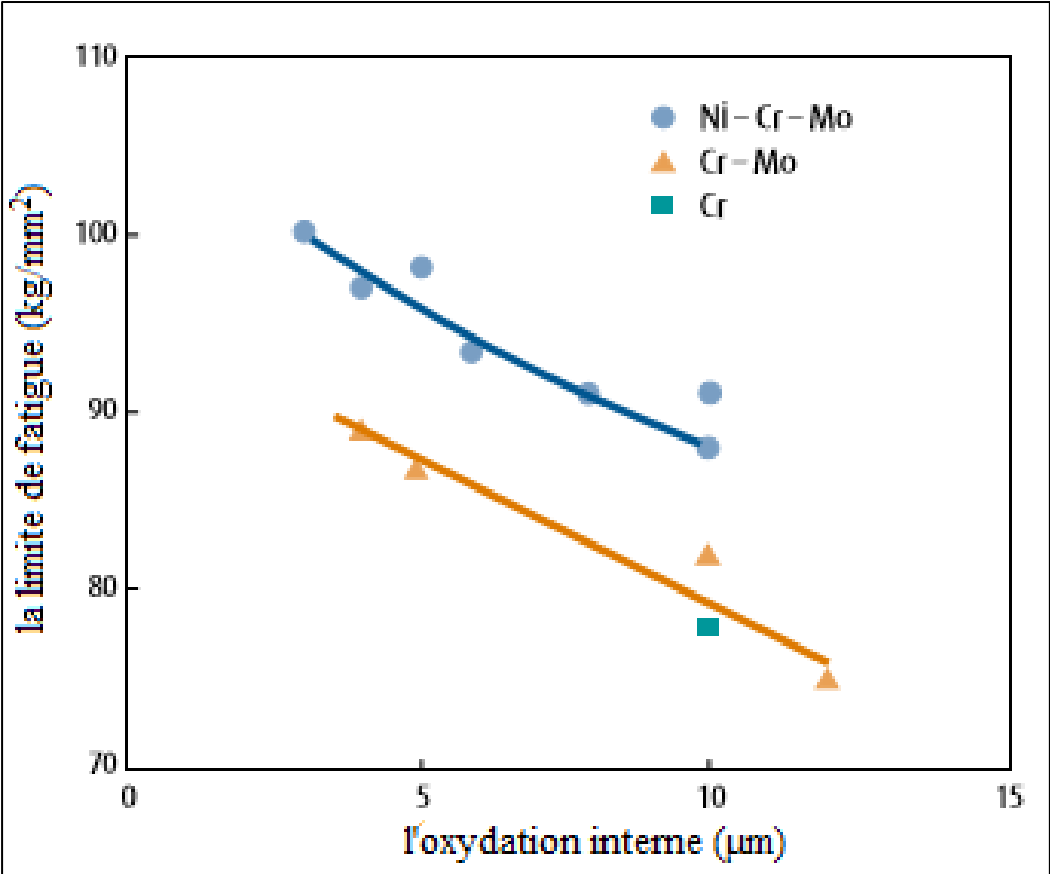


Figure 28: Effet de l'oxydation interne sur la limite de fatigue [28].

Chapitre III

**L'influence des traitements
thermiques (trempe) sur la
microstructure et la
résilience d'un acier cémenté**

III. L'influence des traitements thermiques (trempe) sur la microstructure et la résilience d'un acier cémenté

Pour mieux comprendre l'influence de la trempe sur la structure et les propriétés mécaniques des aciers cémentés à savoir la résilience, une étude a été faite sur un acier de cémentation [52], sa composition chimique est présentée dans le tableau (7).

Tableau 7: Composition chimique de l'acier étudié.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	N	Fe
0,18	0,39	0,75	0,010	0,022	0,35	0,50	0,03	0,0069	Bal

Les pièces étudiées ont subi des traitements thermiques selon les deux cycles représentés dans la figure (29). Le cycle A, après la cémentation à °C 950 les échantillons sont refroidis lentement jusqu'à une température de 860°C et maintenus à cette température pendant 15 minutes avant les trempés à la température ambiante (C860_15).

Cependant, dans le cycle B, les échantillons ont été refroidis à une température de 775 °C et maintenus pendant trois temps 0, 5 et 15 minutes respectivement, qui ont été nommés comme C775_0, C775_5 et C775_15.

La température Ar3 de matériau du base (c.-à-d. : du cœur) est 800°C (Ar3 mesuré par le dilatomètre, c'est la température à laquelle la ferrite commence à transformer hors de l'austénite au cours de refroidissement à une vitesse de 4 °C/min). Ainsi, aucune trace de ferrite n'apparaît dans la microstructure de cœur pour le cycle A (C860_15) (figure 29). Au contraire, le traitement thermique effectué selon le cycle B basé sur le refroidissement à une température de 775°C, produisant des différentes fractions de la ferrite (figure 29).

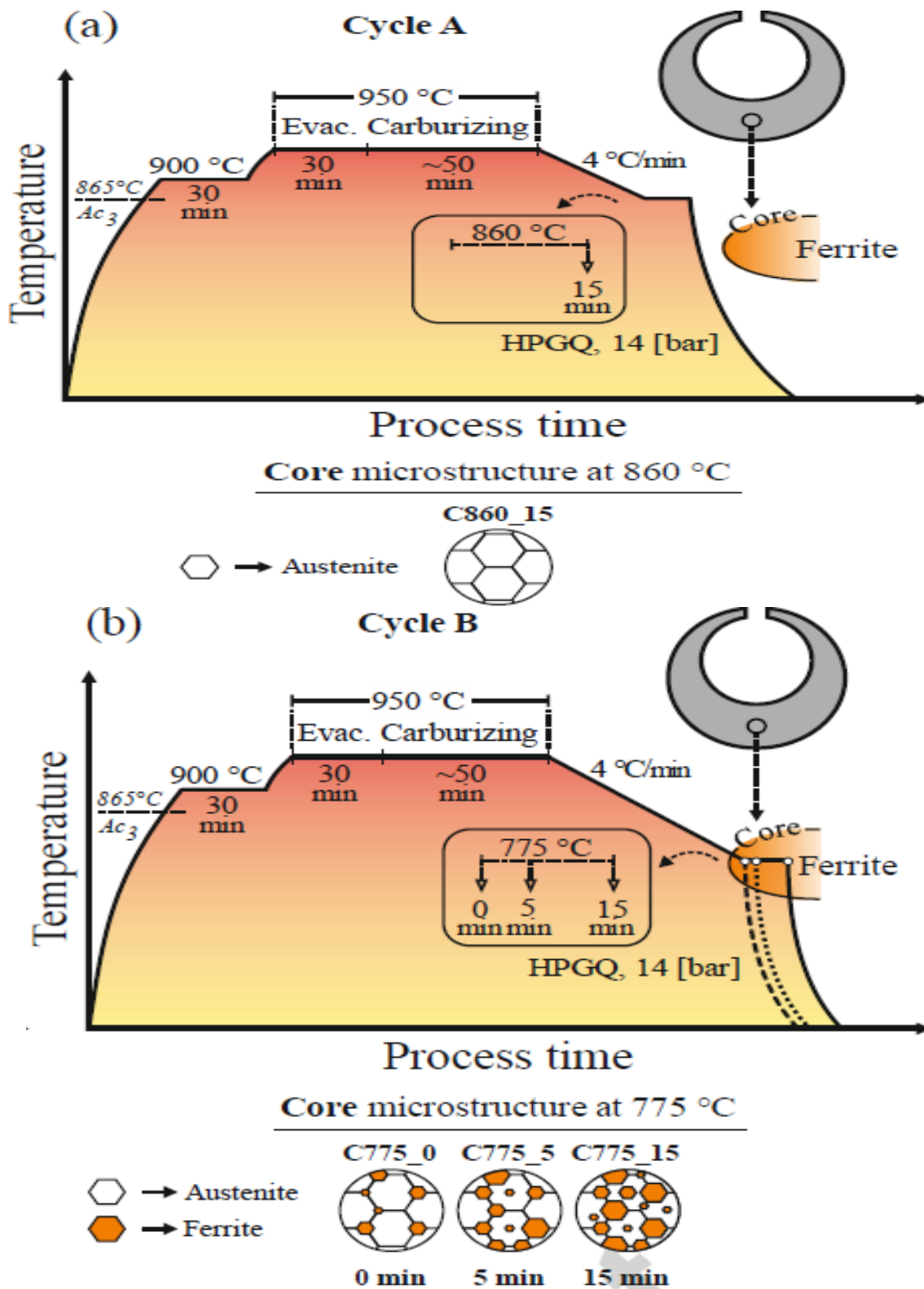


Figure 29: a) Cycle A où l'austénite dans la microstructure du cœur ne se décompose pas 860 °C. (b) Cycle B à la température °C 775 la ferrite peut transformer dans le cœur.

III.1. Test de résilience mécanique

Les éprouvettes de résilience de type Mini-Charpy V sont manufacturées selon la méthode de Kleinstproben, DIN 50115 (figure 30). L'impacteur de la machine utilisée pour les essais de résilience est de 50 joules.

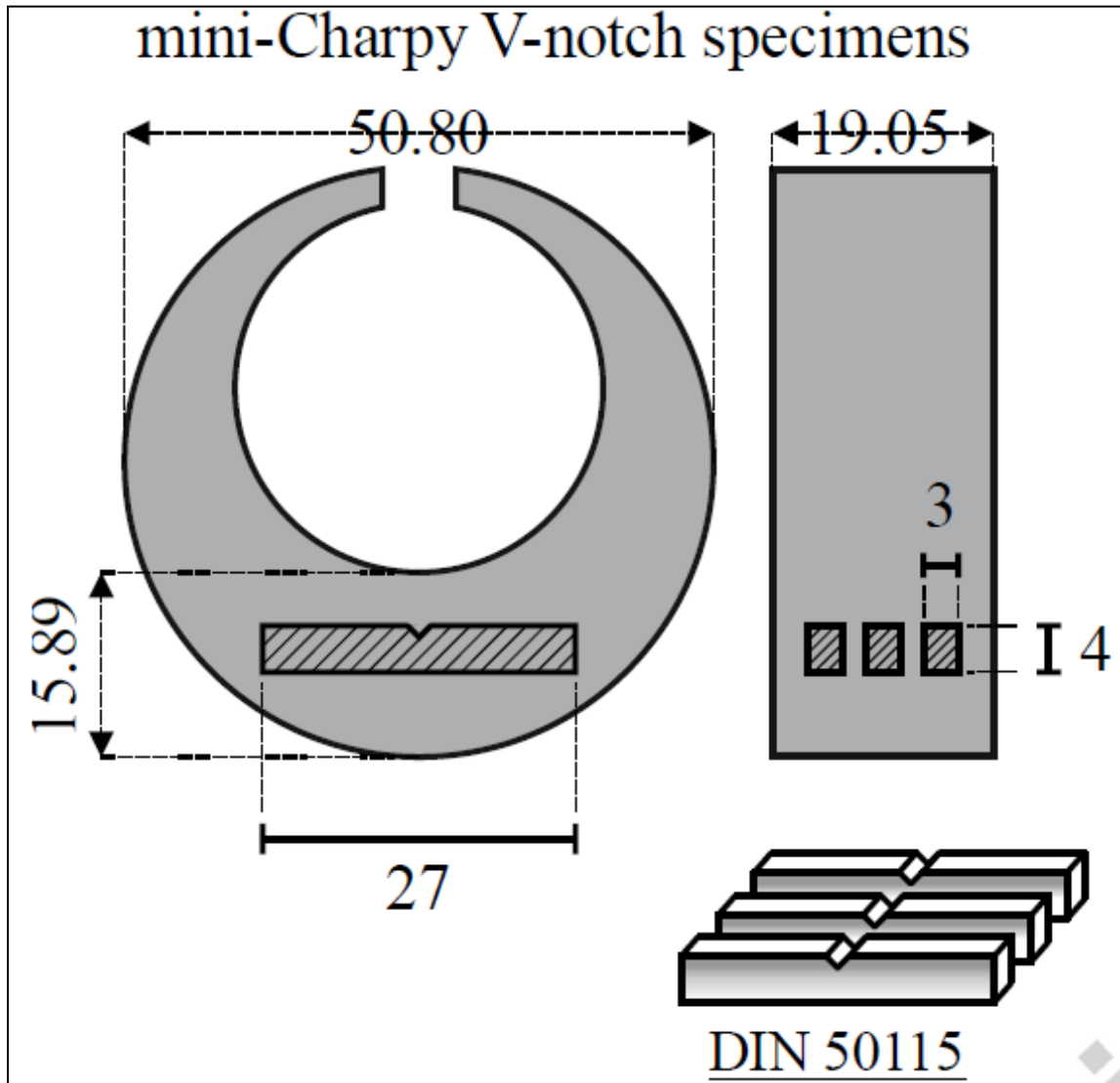


Figure 30: Illustration schématique d'éprouvette Mini-Charpy V (DIN 50115).

III.2. Les Microstructures

La figure 31 présente les microstructures obtenues selon les deux cycles A et B.

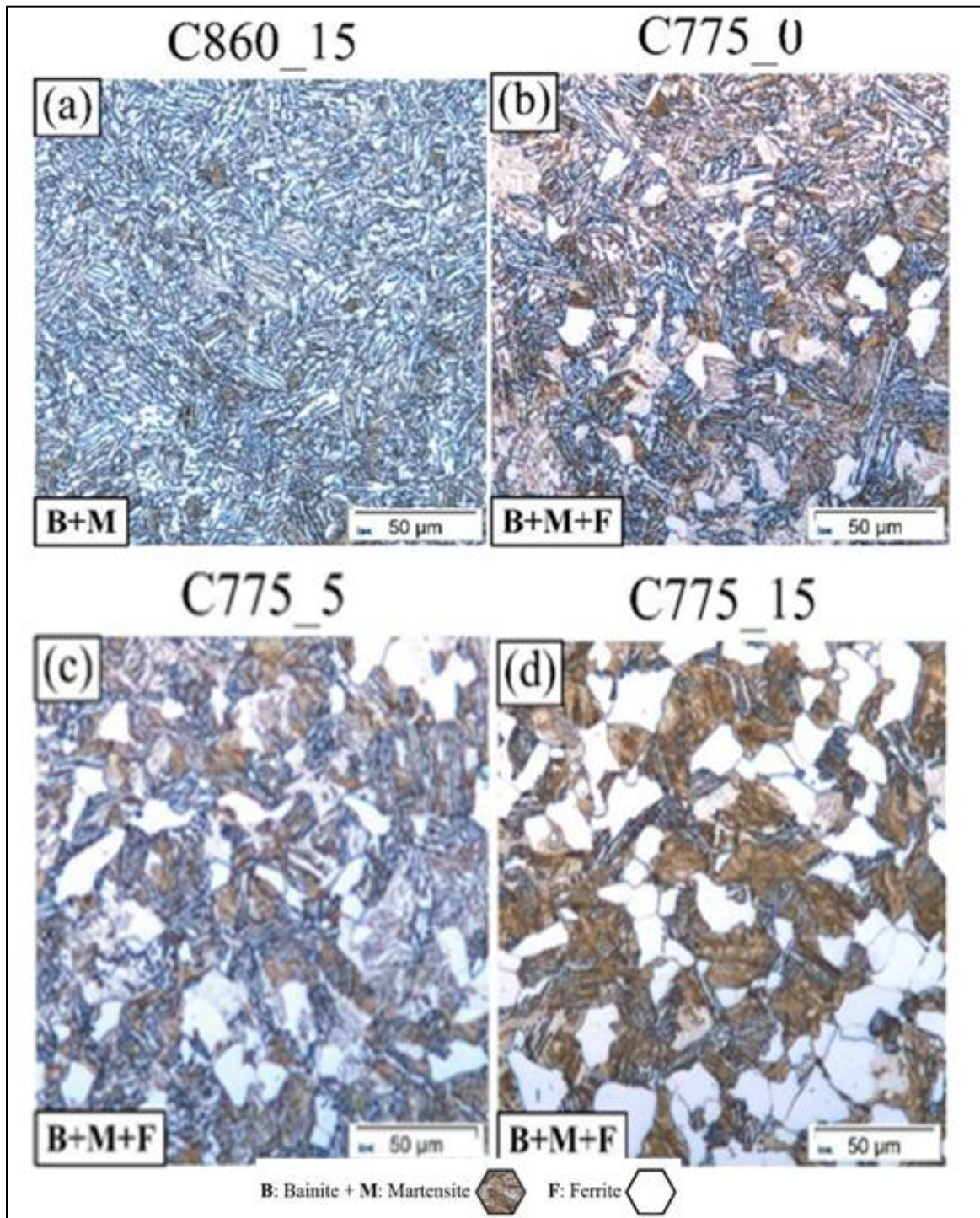


Figure 31: Micrographie optique des échantillons étudiés.

Dans le cas d'échantillon C860_15 il y a une absence quasi totale de la ferrite, la structure est un mélange d'une structure bainitique et martensitique. Cependant, pour les échantillons maintenus à l'isotherme à la température 775°C à différent temps de maintien, la

(trempe) sur la microstructure et la résilience d'un acier cémenté

ferrite se transforme. On autre, on voit les fractions de la ferrite et la martensite augmentent avec l'augmentation du temps de maintien à l'isotherme, tandis que, la fraction de la bainite diminue (tableau 8).

Tableau 8: Fraction volumique des phases.

Echantillon	Ferrite (F)	Bainite (B)	Martensite(M)
C860_15	---	86±5 %	14±5 %
C775_0	06 ±2 %	77±4 %	17±3 %
C775_5	20±5 %	51±3 %	29±4 %
C775_15	30±2 %	23±3 %	47±2 %

Dans le cycle A : à la température 860 °C l'austénite est stable pas de transformation. Durant la trempe, l'austénite se transforme en différentes phases contenant la B et M plus l'austénite résiduelle.

Dans le cycle (B) : à la température 775°C, il y a une formation de la ferrite qui est thermodynamiquement favorisée, qui se développe progressivement en maintenant le temps. Vu à la faible solubilité du carbone dans la ferrite, les atomes de carbone excessifs sont rejetés vers l'austénite en voisinage, avec une solubilité plus élevée de carbone.

La fraction plus grande de la ferrite est créée après 15 minutes de maintien 775°C, et par conséquent, la stabilité chimique de l'austénite atteinte un niveau très élevé avant la trempe. Ceci, freine et limite la suivante phase difusionnelle de la transformation Bainitique, et favorise la formation de la martensite en place. Ceci, explique la différence observée dans les fractions des phases.

La figure (32) montre une simulation microstructurale de la présence de l'austénite résiduelle pour les microstructures finales.

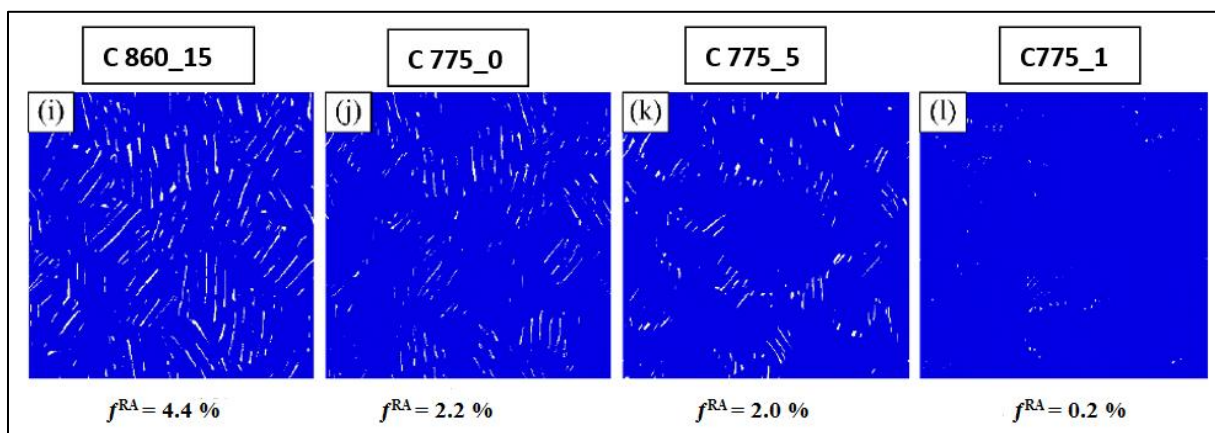


Figure 32: fraction de l'austénite résiduelle présente dans les structures finales obtenue par un logiciel de simulation.

D'après la figure (32), la grande fraction de l'austénite résiduelle est dans le cas de la structure C860_15, cette fraction diminuée graduellement avec la présence de la ferrite. Il est noté, que la fraction de l'austénite résiduelle est directement proportionnelle à la fraction de la bainite.

Durant la formation de la bainite, les atomes de carbone en excès sont diffusés dans l'austénite, et augmentent ainsi leur stabilité chimique. Ceci, explique la relation directe entre la fraction de la bainite et l'austénite résiduelle. Le tableau (9) ci-dessous présente les résultats des tests de résilience.

Il est remarqué que l'échantillon C860_15 présente la plus grande valeur de E_t . Parmi les échantillons qui contiennent de la ferrite, l'échantillon (C775_0) montre une meilleure propriété de résilience, mais, reste inférieur à celle de C860_15.

Tableau 9: Energie totale absorbée par les échantillons.

Échantillon	Energie absorbée par la microstructure (J)
C860_15	7.02±0.2
C775_0	6.18±0.4
C775_5	4.50±0.3
C775_15	3.07±0.4

Il est connu que la propagation des fissures dans les microstructures désordonnées et hétérogènes peut être déviée, par conséquent, améliore la résistance à la propagation des fissures [53].

À cet égard, la bainite est une microstructure mixte à différentes orientations cristallographiques et différents joints de grain de substructure [54]. Dans cette étude, l'auteur a conclu qu'une grande quantité d'énergie a été absorbée par la structure bainitique durant l'initiation des fissures et les différentes étapes de propagation des fissures comparativement aux autres.

IV. Conclusion

Ce travail de mémoire avait pour objectif de déterminer l'effet des différents traitements thermiques du cœur des aciers après la cémentation, sur la microstructure et les propriétés mécaniques à savoir la résilience, Les principales conclusions de cette étude sont résumées comme suit :

1. Le développement progressif de la ferrite dans le cœur enrichit l'austénite au carbone. Ceci, freine et limite la transformation bainitique pendant la trempe et favorise la formation de la martensite en place.
2. Durant la formation de la bainite, les atomes de carbone en excès sont diffusés dans l'austénite, et augmentent ainsi leur stabilité chimique. Ceci, explique la relation directe entre la fraction de la bainite et l'austénite résiduelle.
3. L'amélioration de la résistance au choc est directement proportionnelle à la fraction du bainite et l'austénite résiduelle, et a l'inverse pour la fraction de la ferrite et la martensite. Le rôle du bainite est attribué à la structure intrinsèque avec énormément de joints des grains, ces derniers augmentent la résistance de la propagation des fissures. La présence de l'austénite résiduelle freine la propagation des fissures, contrairement, la ferrite et la martensite qui ont des joints de grain à différente dureté peuvent donner naissance à des fissures, par conséquent, la résilience va diminuer.

V. Référence :

- [1] Lakhtin, Y. Engineering Physical Metallurgy. New delhi, india: CBS Publishers & distributors. (1998).
- [2] Rajan, T. V., Sharma, C. P., & Sharma, A. Heat treatment: principles and techniques. PHI Learning Pvt. Ltd. (2011).
- [3] mohamed, z. t. (2020, 4, 2). Cours Génie des surfaces, nitruration, cémentation, carbonituration et boruration. Récupéré sur Génie de surfaces: <https://elearning.univ-annaba.dz/mod/forum/discuss.php?d=485>
- [4] Boucifi, I. Boutemak, I. Etude microstructurale et mécanique sur l'effet de la boruration sur la nouvelle phase max Cr₂AlC (Thèse de master). (2019).
- [5] Rakhit, A. K. Heat treatment of gears: a practical guide for engineers. ASM international. (2000).
- [6] Fallot, G. Rôle du carbone lors de la nitruration d'aciers de construction et influence sur les propriétés mécaniques (Doctoral dissertation). (2015).
- [7] Gerster AG . (2000/2010). Nitruration gazeuse. Récupéré sur Gerster: https://www.gerster.ch/userfiles/downloads/1419925989128911/Gasnitrieren_f_18122014.pdf
- [8] nitrocarburation. (2020, juin). Récupéré sur bodycote: <https://www.bodycote.com/fr/services/traitement-thermique/traitement-thermochimique-non-suivie-dune-trempe/nitrocarburation/>
- [9] Flodström, I. Nitrocarburizing and high temperature nitriding of steels in bearing applications. (2012)
- [10] Czerwinski, F. Thermochemical treatment of metals. Heat Treatment—Conventional and Novel Applications, (2012). 5, 73-112.
- [11] HARTHA, h. (2020, juin). nitrocarburation. Récupéré sur HALEX GROUP: <https://www.halex-group.de/V1/index.php/fr/hhi-de-verfahren-3/nitrocarburiere-2>
- [12] Ghigliione, D., Leroux, C., & Tournier, C. Cémentation. Carbonituration. Techniques de l'Ingénieur M, 1. (1994).
- [13] SAID, B. traitements thermiques, classification et designation des aciers et fontes.
- [14] American Gear Manufacturers Association. Gear Materials and Heat Treatment Manual. AGMA Standard, C08. (2004).

-
- [15] Noussaiba, G. Fatma, B. Comportements mécaniques Des aciers faiblement alliés avant et après cémentation (Thèse de master). (2016).
- [16] Ray, B. C., Prusty, R. K., & Nayak, D. Phase Transformations and Heat Treatments of Steels. CRC Press. (2020).
- [17] Langevin, C. [Comité Perform] Opérateur en traitement de surface. (2014).
- [18] SAID. Traitements thermiques, classification et designation des aciers et fontes.
- [19] Fayolle, R., Courtois, B., & Rottier, R. Ateliers de traitement thermique : Hygiène et sécurité. Les Cahiers de notes documentaires-Institut national de sécurité, (2001). (183), 5-20.
- [20] Jaypuria, S. Heat treatment of low carbon steel (Doctoral dissertation) (2009). .
- [21] Contrôle de la cémentation gazeuse. Récupéré sur scei-concours.fr: [http://scei-concours.fr/tipe/TIPE_2009/sujets_2009/SI_PT_2009\(DOSSIER_PRINCIPAL\).pdf](http://scei-concours.fr/tipe/TIPE_2009/sujets_2009/SI_PT_2009(DOSSIER_PRINCIPAL).pdf)
- [22] Marray, T. Carbonituration basse pression d'aciers et de pièces obtenues par la technologie MIM (Doctoral dissertation). (2012).
- [23] Vander Voort, G. F., Lampman, S. R., Sanders, B. R., Anton, G. J., Polakowski, C., Kinson, J., ... & Scott Jr, W. W. ASM handbook. Metallography and microstructures, (2004)? 9, 44073-0002.
- [24] Reynoldson, R. W. Heat Treatment: Fluidized Bed Furnaces. ASM International(1993)..
- [25] cementation.. Récupéré sur geocities: <http://www.geocities.ws/mbara2/cementation.html>
(2020, juin)
- [26] Thelning, K. E. Steel and its heat treatment. Butterworth-heinemann. (2013).
- [27] athmani, M. amélioration des propriétés de surface d'un acier à outils de travail à chaud par des traitement thermiques et thermochimiques (cémentation) (Thèse de magister). (2011).
- [28] Linde Gas, S. E. Furnace Atmospheres No. 1, Gas Carburizing and Carbonitriding (2009).
- [29] Amimer, N. Caractérisation d'aciers cémentés par des méthodes non destructives (Thèse de magister). (2007).
- [30] Reynoldson, R. W. Heat Treatment: Fluidized Bed Furnaces. ASM International. (1993).
- [31] Youcef , R. Cémentation, Nitruration des aciers faiblement alliés Amélioration des propriétés d'usure et de frottement (Thèse de magister) (2012)..
- [32] Koretsky, Yan. Durcissement de l'acier. L. : État. Union, maison d'édition de la construction navale. Prom-ti. (1962).

-
- [33] Parrish, G. Carburizing: microstructures and properties. Asm International. (1999).
- [34] Traitements thermique (2020, juillet).: <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:4885:ed-1:v1:fr>
- [35] Prabhudev, K. H. Handbook of heat treatment of steels. Tata McGraw-Hill Education. (1988).
- [36] Natapov B.S. Traitement thermique des métaux. (1980). 288p.
- [37] SCHMOLZ, & BICKENBACH. (2020, juillet). Case-hardening steel Carbodur. Retrieved from dew-stahl: https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Broschueren/053_DEW_Carbodur_GB.pdf
- [38] Biront, V.S. Biront VS Théorie du traitement thermique des métaux.-Recuit: Manuel. Manuel / SFU : ICMiZ - Krasnoïarsk, (2007). –234 p.
- [39] Gupta, J. Mechanical and wear properties of carburized mild steel samples (Doctoral dissertation). (2009).
- [40] Fischer, A., & Bobzin, K. (Eds.). Friction, wear and wear protection (Vol. 10). John Wiley & Sons. (2009).
- [41] Fillot, N. Etude mécanique de l'usure : Modélisation par Eléments Discrets des débits de troisième corps solide (Doctoral dissertation, Lyon, INSA) (2004). .
- [42] Chattopadhyay, R. Surface wear: analysis, treatment, and prevention. ASM international. (2001).
- [43] Brunetière, N. Introduction à la tribologie. Institut Pprime–Futuroscope. (2015).
- [44] Ionescu, C. C. Caractérisation des mécanismes d'usure par tribocorrosion d'alliages modèles Ni-Cr (Doctoral dissertation). (2012).
- [45] Jellad, A. Etude des propriétés mécaniques et tribologiques de couches minces nanostructurées: cas du carbure de chrome (Doctoral dissertation). . (2006).
- [46] BEDLAOUI, A. These de doctorat ,université M'Hamed Bougara Boumerdes. (2019).
- [47] LABIDI, M. Etude du comportement en frottement et usure des matériaux céramiques Al₂O₃ et ZrO₃. annaba: université badji mokhtar (Doctoral dissertation). (2008).
- [48] Campbell, F. C. (Ed.). Fatigue and fracture: understanding the basics. ASM International. (2012).
- [49] Zalt, A. Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des joints soudées de type caisson. Thèse-(ENIM). (2012).
- [50] Parashivamurthy, K. I. Material Science and Metallurgy (2012). (147p).

-
- [51] Naito, T., Ueda, H., & Kikuchi, M. Fatigue behavior of carburized steel with internal oxides and nonmartensitic microstructure near the surface. *Metallurgical Transactions A*, (1984). 15(7), 1431-1436.
- [52] H. Farivar, M.J. Deepu, M. Hans, G. Phanikumar, W. Bleck, U. Prah, Influence of post-carburizing heat treatment on the core microstructural evolution and the resulting mechanical properties in casehardened steel components, *Materials Science & Engineering A*, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.061>.
- [53] S. Li, G. Zhu, Y. Kang, Effect of substructure on mechanical properties and fracture behavior of lath martensite in 0.1C–1.1Si–1.7Mn steel, *Journal of Alloys and Compounds* 675 (2016) 104–115.
- [54] B. Jiang, Z. Mei, L.-y. Zhou, G.-l. Liu, Z.-l. Wang, B. Huang, Y.-z. Liu, High toughness and multiphase microstructure transition product of carburizing steel by a novel heat treatment cooling process, *Materials Science and Engineering: A* 675 (2016) 361–370.